EDMAR EIDY FUTIKAMI

JULIO CESAR CARVALHO

MARCELO STRAPAÇÃO

MIGUEL IGINO VALENTINI

VIVIANE NAGAKURA LIMA

SIMULADOR DE REGULADOR DE VELOCIDADE PARA TURBINAS HIDRÁULICAS FRANCIS

Trabalho de graduação apresentado à disciplina Projeto Final do curso de Engenharia Industrial Elétrica do Departamento de Eletrotécnica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Edson Mancini Filho

CURITIBA

2003

Agradecemos ao professor e orientador Edson Mancini Filho, pelo acompanhamento e revisão do estudo, que propiciaram o desenvolvimento deste projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	- Corrente Alternada
AND	- Porta Lógica E
CLP	- Controlador Lógico Programável
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia Elétrica
DC	- Corrente Contínua
DDE	- Dinamic Data Exchange
EPROM	- Erasable Programmable Read Only Memory
IHM	- Interface Homem Máquina
LED	- Light Emitter Diode
NOT	- Porta Lógica NÃO
OR	- Porta Lógica OU
PI	- Proporcional Integral
PID	- Proporcional Integral Derivativo
RAM	- Random Access Memory

LISTA DE SÍMBOLOS

®	- Marca registrada
δ	- Estatismo
ΔH	- Cota entre dois níveis de água
A	- Ampéres
Hz	- Hertz
Pa	- Pascal
V	- Volts
W	- Watts

RESUMO

Com este projeto procuramos apresentar uma ferramenta destinada a simulação do funcionamento de reguladores de velocidade para turbinas hidráulicas Francis. A análise do funcionamento de um sistema de potência, no qual a literatura especializada praticamente inexiste é de fundamental importância para a formação acadêmica dos engenheiros do setor elétrico. Fizemos um estudo dos dispositivos e circuitos que compõem um regulador de velocidade digital. Seu funcionamento foi descrito e modelamento matemático elaborado. Apresentamos um diagrama em blocos do circuito hidráulico e do circuito eletrônico. Estes circuitos foram elaborados dentro do aplicativo VisSim®onde simulamos seu funcionamento. Finalmente, o diagrama em blocos completo foi transferido através do software Elipse Scada® para uma IHM, tendo como resultado final um simulador de regulador de velocidade digital para turbinas hidráulicas Francis que nos permite acompanhar a partida e a parada do conjunto turbina-gerador, a regulação de velocidade da turbina, manutenção da freqüência nominal e o ajuste da potência ativa conforme variação de carga do sistema elétrico.

Palavras-chave: Regulador de velocidade; Controle de Turbinas Hidráulicas; Simulador.

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de potência encontra-se no estado normal de operação quando a demanda de todas as cargas alimentadas pelo sistema é satisfeita e a freqüência é mantida constante no seu valor nominal.

Na apreciação destes requisitos, deve ser considerado que as cargas do sistema variam de maneira aleatória, embora lentamente e em ciclos diários, semanais e sazonais. Além disso, como a energia não pode ser armazenada, ela deve ser gerada na medida certa no instante em que for solicitada pela carga.

A função de controle de um sistema de potência é manter o sistema operando no estado normal. Em outras palavras, trata-se de garantir um suprimento contínuo de energia respeitando-se simultaneamente certos padrões de qualidade.

Manter a freqüência constante e igual ao valor nominal é importante por uma série de motivos. Por exemplo, o desempenho de motores de corrente alternada é função da freqüência e a freqüência nominal também é exigida por cargas nobres como computadores. Mas o motivo mais importante para manter a freqüência igual ao seu valor nominal é o fato de que ela é um indicador de que o balanço de potência ativa está sendo adequadamente cumprido. Isto é, a potência ativa fornecida pelos geradores do sistema é igual a potência ativa solicitada pelas cargas.

Assim controlando-se a velocidade de turbina que está ligada ao gerador, controla-se essencialmente a potência ativa e conseqüentemente a freqüência. O regulador de velocidade basicamente monitora a velocidade do conjunto turbina-gerador e controla o torque mecânico da turbina de modo a fazer com que a potência elétrica gerada pela unidade se adapte às variações de carga e que em desvios de freqüência haja restabelecimento de seu valor nominal.

Portanto, a análise do funcionamento do regulador de velocidade para turbinas hidráulicas é muito importante para a formação dos futuros engenheiros do

setor elétrico. O ideal seria que as instituições de ensino superior fossem dotadas de laboratórios com esses equipamentos, mas suas dimensões e custos tornam esta medida inviável.

Sendo assim uma alternativa para suprir esta carência é a elaboração de um modelo, em dimensões menores, que execute de forma semelhante todas as funções do original frente às condições de operação. Portanto, a possibilidade do desenvolvimento de um simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis que além de substituir o original não ocupa espaço é muito interessante.

1.1 JUSTIFICATIVA

O produto resultante deste projeto servirá de instrumento facilitador para a compreensão do sistema em questão e virá a suprir a carência de trabalhos técnicos a respeito deste assunto em nossa instituição de ensino.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O projeto proposto teve por objetivo estudar o funcionamento do regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis e através do desenvolvimento de um simulador mostrar a sua atuação em conjunto com esta turbina.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto foram os seguintes:

a) elaborar uma pesquisa detalhada a fim de reunir a bibliografia necessária para o estudo do caso em questão;

b) analisar e estudar o sistema de regulação de velocidades em conjunto com o professor orientador;
c) elaborar um descritivo sobre o princípio de funcionamento e partes componentes dos circuitos hidráulico e eletrônico;
d) definir um modelo matemático para os circuitos hidráulico e eletrônico;
e) testar através de simulação utilizando o software VisSim® (Versão Acadêmica) separadamente cada uma das partes componentes do regulador;
f) desenvolver um simulador interativo com IHM amigável (Visual Basic®, Elipse Scada® ou Intouch®) do regulador de velocidade completo;
g) incluir no simulador interativo o controle do sistema de fornecimento de óleo sob pressão, de controle de posição do servomotor para os casos de partida e parada da turbina, de regulação da freqüência, de limitação de abertura do distribuidor e de ajuste de potência ativa;
h) elaborar um manual para utilização do simulador.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia para a realização deste projeto foi baseada na execução de atividades inicialmente propostas. Cada componente da equipe estava associado a uma ou mais atividades sempre com o acompanhamento do professor orientador. O período para realização das atividades seguiu um cronograma definido. No final de cada mês foi realizada uma reunião para avaliação e revisão das atividades. As principais atividades realizadas para este projeto foram as seguintes:

a) pesquisa detalhada a fim de reunir a bibliografia necessária para o estudo do caso;
b) análise e estudo do sistema de regulação de velocidade através de aulas que foram ministradas pelo professor orientador;

c) elaboração de um descritivo sobre o princípio de funcionamento e partes componentes do circuito hidráulico e eletrônico através de bibliografia encontrada;
d) definição de um modelo matemático através de diagramas em blocos que representam os elementos do regulador de velocidade para turbinas hidráulicas;
e) testes através de simulações com o software VisSim® do modelo matemático encontrado;
f) desenvolvimento do simulador interativo com IHM amigável (Elipse Scada®) do regulador de velocidade completo;
g) elaboração de um manual para utilização do simulador.

2 REGULADOR DE VELOCIDADE PARA TURBINAS HIDRÁULICAS FRANCIS

O regulador de velocidade é um sistema de controle automático cuja função principal é manter a rotação da turbina constante para que o gerador forneça energia ao sistema elétrico na freqüência de 60 Hz.

A ação deste controle é comandar a abertura ou fechamento do distribuidor da turbina (palhetas diretrizes) regulando a vazão de água que entra no rotor da turbina. Estas palhetas abrem com determinado ângulo possibilitando a passagem de água de acordo com o perfil hidráulico.

É o regulador que propicia a partida da unidade levando-a desde a rotação nula até a rotação nominal através da abertura do distribuidor da turbina. A parada da turbina também cabe ao regulador.

Quando houver uma rejeição de carga, com parada parcial, o regulador deve ser capaz de manter o conjunto turbina-gerador com rotação nominal para que seja conectado novamente ao sistema elétrico. Se a rejeição de carga for com parada total o regulador deverá efetuar a parada da unidade.

E finalmente, como última atribuição do regulador de velocidade, ele deve ser capaz de ajustar a potência ativa para o caso de tomada ou alívio de carga do sistema elétrico e provocar abertura ou fechamento automático do distribuidor nos casos de subfreqüência ou sobrefreqüência, respectivamente, conforme sua característica de estatismo.

2.1 TURBINAS HIDRÁULICAS FRANCIS

As turbinas hidráulicas convertem a energia potencial da água em energia cinética, pela utilização de diferenças entre dois níveis de água, sendo esta a diferença de cota ΔH. Essa diferença entre dois níveis de água é usualmente obtida pela construção de uma barragem, cuja altura dependerá das condições do local. A

variedade de combinações de alturas e descargas em instalações hidrelétricas permite uma grande variação dos tipos de turbinas hidráulicas.

As turbinas hidráulicas podem ser então divididas em duas classes:

a) turbinas de reação que são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do rotor. Essas turbinas são as mais usuais no Brasil e cobrem uma faixa de quedas médias (10 a 200 m) para as instalações hidrelétricas. Elas podem ser do tipo Kaplan ou Francis. Nas turbinas de reação a caixa espiral tem a função de guiar a água totalmente e uniformemente por toda a circunferência através do distribuidor. O distribuidor tem o objetivo de dirigir a vazão de água diretamente para a roda e, regular a descarga através da turbina. O tubo de sucção, nos mais diferentes tipos, reduz a velocidade da água na saída da turbina. Cada turbina pode ser dividida, também, dependendo da sua velocidade específica, podendo ser, de baixa, média ou de alta velocidade;
b) turbinas de ação que são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do rotor. Essas turbinas são operadas sobre pressão atmosférica por um jato livre, são menos usuais no Brasil e cobrem uma faixa de quedas maiores (acima de 200 m) para as instalações hidrelétricas. Elas são denominadas turbinas Pelton. Nas turbinas de ação a água não passa por toda a circunferência da roda, mas através dos jatos.

Para o nosso estudo optamos pelo regulador de velocidade para turbina hidráulica tipo Francis, pois é este o tipo de turbina predominantemente utilizada nas usinas hidrelétricas do estado do Paraná. A turbina Francis foi idealizada em 1849, tendo o nome do seu inventor, sendo que a primeira turbina foi construída pela firma

J.M. Voith em 1873, passando desde então por aperfeiçoamentos constantes, como a utilização das pás diretrizes.

Este tipo de turbina tem sido aplicado largamente, pelo fato das suas características cobrirem um grande campo de rotação específica. Atualmente são construídas para grandes aproveitamentos hidrelétricos, podendo ultrapassar a potência unitária de 750 MW. Na turbina Francis o rotor fica internamente ao distribuidor, de modo que a água ao atravessar o rotor da turbina aproxima-se constantemente do eixo. São rigorosamente centrípetas e permitem o uso de um tubo para conduzir a água até um poço, chamado de tubo de sucção. A função do tubo de sucção é manter a continuidade da massa líquida em escoamento, impedindo que caia livremente, conseguindo desse modo, um aumento da queda hidráulica. Por conseqüência, ocorre um aumento na potência da turbina, pois houve transformação da energia cinética que possui a água ao sair em energia de pressão. Em operação, a água entra no rotor pela periferia, após passar pelas pás diretrizes, as quais guiam o líquido em um ângulo adequado para a entrada das pás do rotor, deixando o mesmo axialmente em relação ao eixo.

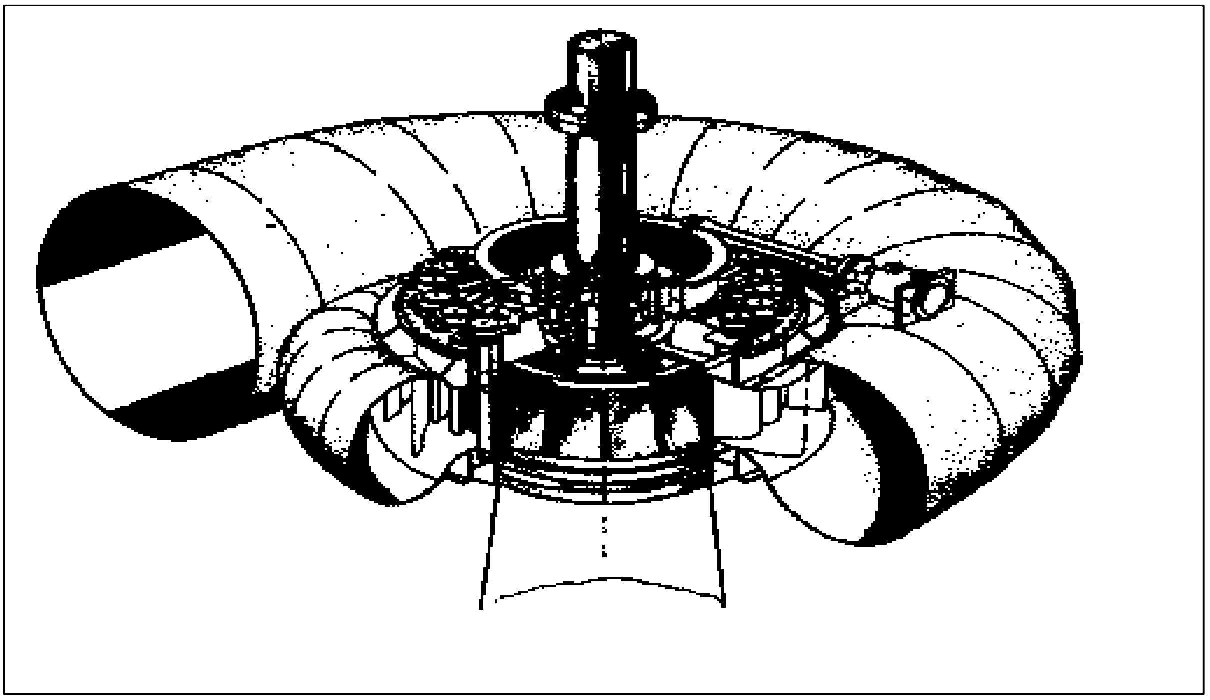
O distribuidor das turbinas Francis é constituído de um conjunto de pás diretrizes dispostas em volta do rotor, podendo ser ajustado um melhor ângulo de entrada para cada valor de descarga, obtendo um mínimo de perdas hidráulicas. As pás desta turbina possuem um eixo de rotação paralelo ao eixo da turbina e podem girar simultaneamente de um mesmo ângulo, fazendo a seção de escoamento variar de uma admissão máxima até o fechamento total.

As turbinas Francis modernas estão sempre ajustadas com as pás diretrizes e as mesmas são comandadas pelo regulador de velocidade que ajustam a vazão conforme a carga da turbina.

A turbina Francis pode ser executada tanto com eixo na horizontal quanto na vertical. A construção com o eixo na horizontal, ou seja, a rotor trabalhando verticalmente é utilizado para pequenas unidades, nesse caso apoiado em mancais

de deslizamentos radiais e dispensam a utilização de mancais guias. Quando a construção é de eixo vertical, mancais guias e mancal de escora axial são utilizados. A turbina Francis é uma das mais difundidas e utilizadas no Brasil tanto para grandes quanto para pequenas centrais hidrelétricas.

FIGURA 01 - TURBINA TIPO FRANCIS



FONTE: ITAIPU BINACIONAL

2.2 DESCRIÇÃO GERAL DO REGULADOR DE VELOCIDADE

No sistema elétrico brasileiro temos basicamente três gerações de reguladores de velocidade: os mecânicos, os eletrônicos-analógicos e os digitais. Um grande número de usinas hidrelétricas opera ainda com reguladores mecânicos, muitas delas de forma precária. Com o avanço da eletrônica foi possível a modernização destes reguladores. Os reguladores digitais estão cada vez mais baratos, possuem um grande número de funções de controle, não necessitam de mão de obra qualificada e podem ser diagnosticados à distância via modem. Outros aspectos importantes como índice de confiabilidade e disponibilidade, integração do

controle supervisório com a aquisição de dados são fundamentais para a minimização dos custos de operação e manutenção de uma usina.

O regulador de velocidade para turbinas Francis de grande potência considerado para o estudo é do tipo eletro-hidráulico digital com função P.I. (Proporcional-Integral) com um canal de regulação de potência independente do canal de regulação de rotação, possuindo além do limitador de abertura um canal de regulação de abertura com malha aberta para potência ou rotação, este último sem a característica de estatismo.

Este regulador divide-se em um circuito hidráulico e um circuito eletrônico. O circuito hidráulico é responsável pelo acionamento do distribuidor da turbina e o circuito eletrônico é responsável pela elaboração do sinal de controle adequado para que a regulação seja estável e precisa.

2.2.1 Circuito Hidráulico

O circuito hidráulico pode dividir-se em duas partes distintas, uma responsável pela manutenção do óleo sob pressão e outra contendo válvulas que direcionam esse óleo para o acionamento do servomotor de comando das palhetas diretrizes. Este circuito hidráulico segundo MANCINI FILHO (1987) para projeto, fabricação e aquisição de reguladores para COPEL deve ser composto por:

a) reservatório de óleo sem pressão;
b) conjunto de bombas;
c) acumulador ar-óleo sobre pressão;
d) sistema de ar-comprimido;
e) válvula de descarga;
f) eletro-válvula de comando da válvula de isolamento;
g) acionamento hidráulico;
h) válvula de isolamento;

i) válvula distribuidora;

j) atuador eletro-hidráulico;

l) eletro-válvula de emergência;

m) servomotor;

n) trava hidráulica;

o) válvula de parada de emergência.

O reservatório de óleo sem pressão possui uma capacidade mínima de 110% do volume total de óleo requerido pelo sistema do regulador, janela de inspeção e um respiro com filtro de ar. Este reservatório também tem duas conexões com registros, para enchimento e drenagem do óleo e para eventual filtragem externa do óleo. Todas as entradas de óleo ao reservatório estão abaixo do nível mínimo do óleo em operação normal, para evitar a formação de espuma no óleo. Existem filtros para o retorno do óleo ao reservatório.

Para o controle do reservatório um indicador visual do nível do óleo mostra a faixa de operação (Normal-Permitida-Perigosa). Outro instrumento de controle é um termômetro que faz a medição da temperatura do óleo. O óleo utilizado é o mesmo especificado para o mancal da turbina.

O conjunto de bombas montado no reservatório de óleo é acionado por motores elétricos. A admissão das bombas é protegida por filtros de tela e apropriadas para funcionamento não imersas em óleo em qualquer condição de operação. O filtro de entrada é facilmente removível para permitir a limpeza com as bombas em operação. Cada motor, tubos e válvulas associadas à bomba são agrupadas em um compartimento compacto com um mínimo de acessórios e conexões, incluindo válvula de descarga, válvula de alívio e retenção.

Conjunto de bombas possui capacidade de descarga superior a 2,5 vezes o deslocamento para o curso dos servomotores de acionamento do distribuidor por minuto, quando está trabalhando sob pressão máxima normal de operação. Para cada bomba é conectada uma válvula de alívio de capacidade suficiente para débito

pleno e serviço contínuo operando com pressão 10% acima da normal de operação. Também é conectada uma válvula de retenção em cada bomba para impedir o retorno do óleo com o motor parado.

Para o controle e operação das bombas existe um registro com conexão apropriada para o acoplamento de um manômetro ligado na saída de cada bomba, um pressostato com chave de mercúrio montado na tubulação de saída da bomba, para atuar durante o ciclo de descarga e suportar a pressão de operação e um manômetro para medição da pressão de serviço do regulador.

O acumulador ar-óleo sob pressão inclui um tanque de pressão, no qual óleo e ar são armazenados, destinado a suprir energia hidráulica ao regulador e servomotores no caso de falta de energia para alimentação dos motores que acionam as bombas. Em todas as tubulações entre o acumulador e outros equipamentos existem registros manuais próximos ao tanque.

O controle de pressão do acumulador é efetuado por meio de uma válvula de descarga. A válvula de descarga é operada por pressão de óleo piloto ou eletricamente, abre e fecha firmemente nas pressões ajustadas. O acumulador é provido com uma válvula de alívio de segurança, montada no topo do tanque, a qual evita que a pressão no tanque atinja valores elevados que possam comprometer a segurança da instalação.

O automatismo de controle das bombas prevê partida escalonada dos motores e as faixas de trabalho das bombas de retaguarda não deverão se sobrepor. Uma bomba opera como preferencial e a outra opera como retaguarda. A partida da bomba de retaguarda, em operação normal, é acionada quando a pressão do óleo do acumulador for inferior à pressão de 90% da pressão máxima normal de operação, com intervalo de 3% de variação da pressão entre uma partida e anterior. A parada das bombas é na ordem inversa da partida. Quando a turbina está parada, o automatismo de controle das bombas efetua a reposição de óleo sempre que estiver abaixo da pressão mínima normal de operação.

O automatismo de controle das bombas desliga todos os motores se o nível do acumulador ultrapassar o limite de operação segura, independente da pressão ou se o nível do reservatório de óleo for muito baixo. Com falta de tensão no Centro de Controle de Motores da unidade, ocorre a parada de todas as bombas.

Para o controle de operação do acumulador existe um indicador visual do nível de óleo, um manômetro para indicar a região de variação normal da pressão do acumulador até a região perigosa de operação. Existe ainda para o controle do acumulador, um transdutor de pressão para pressão de zero a 150% da pressão máxima normal de operação, um conjunto de pressostatos com chave de mercúrio e uma chave de nível para a lógica de comando da unidade.

Para cada unidade existe um sistema de ar comprimido para carregamento inicial e manutenção da pressão do acumulador. O sistema inclui compressor acionado por motor elétrico, purgador de umidade, filtros, arrefecedores, proteções de guarda para correia e polia, tubulação e válvula de proteção.

As válvulas do circuito hidráulico de comando dos servomotores de acionamento das palhetas é montado em um único conjunto. Todas as válvulas hidráulicas e tubulações são projetadas e arranjadas de maneira a eliminar automaticamente o ar quando do enchimento do óleo e a impedir a entrada de ar no sistema em qualquer condição de operação.

As válvulas de descarga descarregam no reservatório sem pressão o óleo quando há sobrepressão no circuito hidráulico ou quando o nível de óleo do acumulador está alto. Neste último caso uma válvula de intermitência percebe pela pressão o nível do acumulador e aciona a válvula de descarga.

A válvula de isolamento faz o isolamento entre o acumulador de pressão e o regulador hidráulico. A válvula é acionada hidraulicamente utilizando o óleo do acumulador de pressão e o comando de abertura e fechamento é realizado por uma eletro-válvula. Para o controle e supervisão da operação da válvula de isolamento existe um pressostato com chave de mercúrio montado na tubulação de saída da

válvula, o contato da chave deverá fechar com o aumento da pressão. Também é instalado um manômetro adequado para a pressão de serviço do regulador.

Um conjunto de eletro-válvulas é montado no tanque de óleo, providas de dispositivos adequados para acionamento manual. A eletro-válvula de isolamento é responsável pela abertura e fechamento da válvula de isolamento entre o acumulador de pressão e o regulador hidráulico, comandada por dois solenóides, um para comando de abertura e outro para comando de fechamento. Os comandos de abertura e fechamento serão dados pela lógica de comando da unidade.

A válvula distribuidora contém um dispositivo de ajuste individual, do tempo de abertura e do tempo de fechamento do servomotor. O dispositivo limita efetivamente a vazão de óleo entre a válvula distribuidora e os servomotores. A faixa de ajustes acerta os tempos do distribuidor a fim de cumprir as exigências impostas pelo regulador. Portanto, é a válvula distribuidora que executa os comandos hidráulicos de abertura e de fechamento dos servomotores com a ordem recebida do atuador.

O atuador que é um transdutor eletro-hidráulico e as válvulas de controle formam uma unidade integrada com todos os componentes facilmente acessíveis. O transdutor controla a válvula distribuidora principal o mais diretamente possível, de forma a minimizar os efeitos de atrito, folgas mecânicas e variação da temperatura do óleo. Este é um dispositivo que transforma o sinal elétrico de saída do regulador em um deslocamento mecânico proporcional. Ele é montado no reservatório da unidade de bombeamento e atua diretamente na válvula principal de distribuição do óleo pressurizado que vai aos servomotores que controlam a turbina. O transdutor é capaz de controlar um circuito de força mecânica normal através da válvula de distribuição e do servomotor de operação.

A energia elétrica é fornecida pelo regulador eletrônico de velocidade e a pressão do óleo é suprida pelo acumulador. Na tubulação do transdutor existe um filtro duplo para limpeza sem que haja necessidade de desligamento da unidade e

uma válvula de sustentação da pressão. A força atuante sobre o atuador, com a eletro-válvula de bloqueio do regulador desligada, age no sentido de fechamento das palhetas.

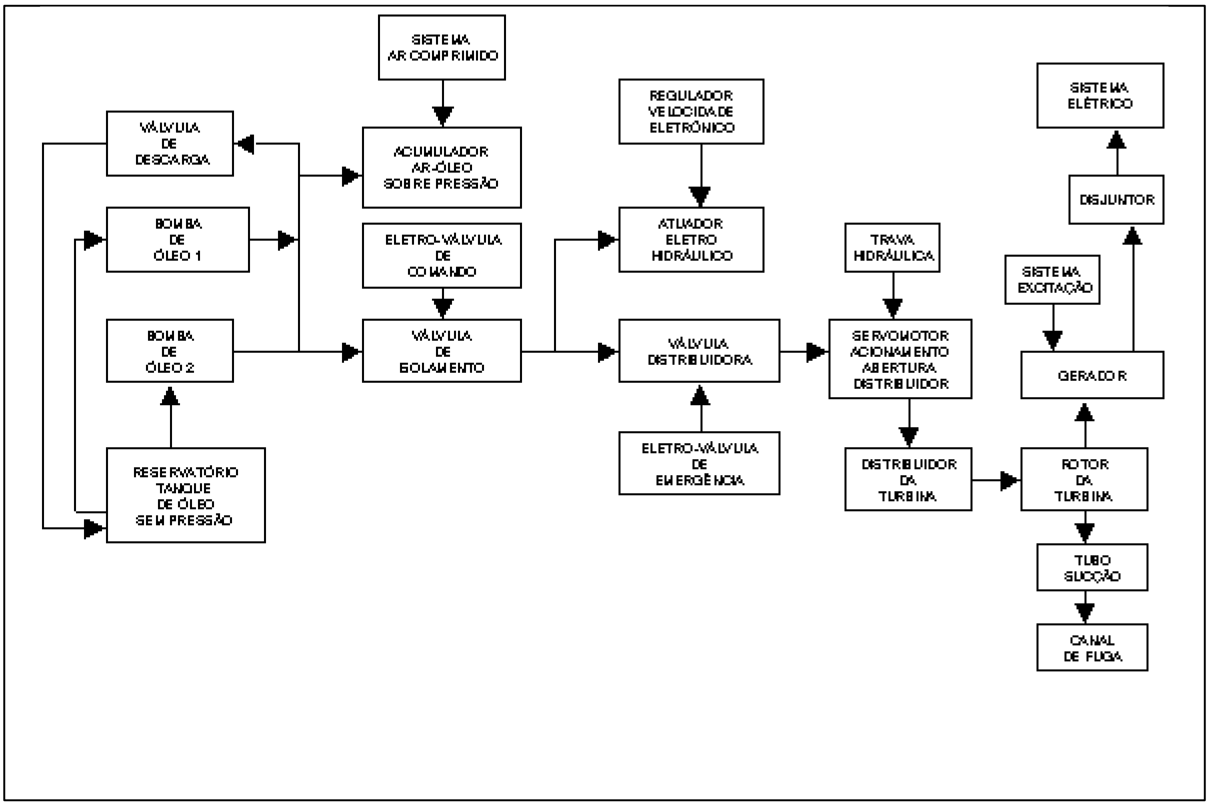
Uma eletro-válvula de partida e parada da unidade é montada no circuito hidráulico de controle do atuador, das válvulas de controle e da trava do servomotor, com contatos fim de curso. A válvula de bloqueio do regulador opera para a parada normal da unidade e também para o completo fechamento das palhetas, na velocidade normal de fechamento e independente da operação do transdutor eletro-hidráulico, nas paradas por proteção. As forças atuantes sobre a válvula distribuidora principal e demais válvulas de controle, com a eletro-válvula de bloqueio do regulador desligada, age no sentido de fechamento das palhetas.

O servomotor é o dispositivo que efetua a abertura ou fechamento do distribuidor através do comando de controle que chega ao circuito hidráulico pelo atuador. O funcionamento básico do servomotor é que através da válvula distribuidora ele recebe óleo sob pressão em sua câmara vindo a provocar abertura ou fechamento do distribuidor. A realimentação estática da posição do servomotor é o elemento que fornece ao regulador a informação acerca de grau de abertura do servomotor ao qual ele é conectado através de um sistema de alavanca. Esta realimentação consiste de um dispositivo transformador diferencial eletromecânico que fornece um sinal de saída proporcional ao deslocamento do servomotor. A unidade é completada com chaves de ajuste de limites. Existe ainda uma trava hidráulica que é acionada em caso de emergência vindo a provocar o fechamento do servomotor.

A válvula de parada de emergência é acionada diretamente pelo dispositivo mecânico de sobre-velocidade montado no eixo da turbina, e fecha completamente as palhetas na velocidade normal de fechamento e independentemente da operação do transdutor eletro-hidráulico. O rearme desta válvula é manual.

Para cada regulador existe um painel para comando individual dos equipamentos do sistema de óleo. Nele constam seletores de comando local dos motores das bombas de óleo, eletro-válvulas, motor do compressor, escolha de bomba preferencial e lâmpadas de sinalização de partida e parada dos motores.

FIGURA 02 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CIRCUITO HIDRÁULICO



FONTE: ANOTAÇÕES DE AULA
NOTA: DISCIPLINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA - CEFET-PR

2.2.2 Circuito Eletrônico

O sinal de controle fornecido por este circuito atua comandando a abertura ou fechamento do servomotor. Este circuito deve ajustar valores de referência, verificar erro de velocidade, executar características P.I.D. do compensador, fornecer característica de estatismo, controlar potência ativa e limitar abertura do distribuidor. Este circuito segundo ESTEVE e BENTO JUNIOR (2000) para o modelo de regulador digital fabricado pela VOITH SIEMENS deve ser composto por:

a) dispositivos de monitoração de potência, freqüência, rotação da turbina e abertura do distribuidor;
b) dispositivos de ajuste de valor de referência de potência, freqüência, rotação da turbina e abertura do distribuidor;
c) regulador de velocidade;
d) regulador de potência;
e) dispositivo de seleção do tipo de controle;
f) seletor valor mínimo.

O hardware de um regulador digital específico do fabricante citado acima consiste de módulos eletrônicos programáveis, fontes de alimentação, painel de comando para operação local, amplificador de saída e dispositivos para desacoplamento e ou transformação de sinal.

A unidade eletrônica digital deste regulador é um controlador programável de alta performance, alojado em um módulo compacto composto de fonte de alimentação, memória do usuário, processador, módulos de entradas analógicas e digitais, transdutor de rotação e módulo de interface serial.

O programa aplicativo de gerenciamento deste regulador pode ser armazenado tanto em memória RAM com baterias, como em EPROM. Com isso, garante-se que não haverá parada do programa em decorrência de falta de tensão elétrica. Para continuar operando sem perturbações mesmo em caso de falta de tensão, todos os módulos de memória da memória de acesso aleatório (RAM) são providos de baterias de alimentação flutuante. Tais baterias devem ser trocadas a cada cinco anos ou quando LED bateria acender. Os módulos de entradas e saídas necessários são projetados de acordo com as funções especificas que serão executadas na regulação da máquina.

Todos estes módulos eletrônicos são redundantes, ou seja, estão duplicados no regulador a fim de prover uma redundância completa, não só de CPU´s e da memória, mas também do módulo de alimentação, dos módulos

entrada/saída e do módulo contador. Os dois CLP´s têm o mesmo programa. O CLP 1 é o CLP principal. Quando há um defeito grave que impossibilite o CLP 1 de executar o programa, o CLP 2 assume sem qualquer influência na operação da unidade. Um sinal de falha no CLP 1 será então acionado. Todas as entradas digitais dos dois CLP´s são conectadas em paralelo. As saídas digitais dos dois CLP´s são combinadas via diodos como portas OU. As saídas analógicas serão comutadas em caso de falha no CLP 1 via relés.

O painel de comando contém todos os elementos de indicação e manobra para a operação do regulador digital da turbina. Esta unidade consiste em um display de cristal líquido capaz de exibir gráficos, um teclado de membrana com teclas de funções programáveis e um campo de entrada numérica. O painel de comando é conectado ao controlador programável via interface serial. Este painel de comando pode ser instalado dentro ou fora do cubículo do regulador.

Para alteração dos ajustes de regulação, a tela principal do programa gerenciador deve estar ativa. Existem telas de alarmes e eventos, tela de manutenção e tela de parâmetros. Para alterar um ajuste, seleciona-se com as teclas do cursor o campo de entrada do ajuste desejado (abaixo do valor real). O ajuste selecionado é indicado através de um display inverso. Subseqüentemente, um novo ajuste pode ser inserido através das teclas numéricas e então ser reconhecido pressionando-se a tecla ENTER. Para transferir o novo ajuste ao controlador programável, é necessário pressionar a tecla CONFIRMAÇÃO. Com isso, o controlador programável ajusta o valor atual desejado para o novo valor através de uma rampa ajustável por parâmetros. Se necessário, os ajustes podem ser indicados remotamente, através de saídas de sinais analógicos.

A faixa de ajuste normal para regulação da velocidade é de 90% a 110%. Porém, é possível ajustar a faixa para outros valores. O display indica o ajuste de velocidade e a velocidade real permanentemente. Além disso, há também entradas de controle remoto para ajuste de velocidade e também para sincronização.

A regulação de abertura pode ser ajustada de zero a 100%. O ajuste de abertura e o valor real de abertura são indicados no display. Paralelamente aos botões de ajuste locais há também entradas de controle remoto para ajuste de regulação de abertura. A regulação de potência pode ser ajustada entre o mínimo valor pré-ajustado e o máximo valor por meio das teclas de ajuste do valor desejado. Paralelamente os botões de comandos locais, há também entradas de controle remoto para ajuste do ponto de regulação.

O painel de comando é dotado de botões para seleção de funções. A função selecionada é indicada por LED´s. Além desses botões de comando há também entradas de controle remoto para a seleção da função desejada.

O botão "PARTIR" permite a partida automática da turbina estando ela pronta para esta operação. Já o botão "PARAR" acionado permite a seqüência automática de parada.

Apertando-se o botão "REGULAÇÃO DE VELOCIDADE - OPERAÇÃO ISOLADA" ocorre a transferência do regulador para regulação de velocidade com a estabilização de sistema isolado. Caso, a operação precedente tenha sido com regulação de abertura ou potência, é ativada a regulação de velocidade com estabilização isolada. O regulador comuta automaticamente para operação isolada quando o disjuntor do gerador é aberto ou quando os limites da faixa de velocidade são ultrapassados.

Com o disjuntor do gerador fechado e a freqüência dentro da faixa permitida (ajustável), o regulador de velocidade é comutado automaticamente para a regulação da velocidade com estabilização da rede. Se o disjuntor estiver fechado e se o regulador foi comutado para operação isolada por ter ultrapassado a faixa de freqüência permitida, ocorreu a comutação automática para estabilização rede operação isolada. O retorno para rede operação interligada só pode ser feito manualmente, condicionado àpermanência da freqüência dentro da faixa permitida.

O botão "REGULAÇÃO DE ABERTURA" faz a comutação para regulação

de abertura. A comutação só é possível com disjuntor do gerador fechado e durante a operação interligada. Devido ao prévio controle de atualização do ajuste de abertura, a comutação do modo de regulação atual para regulação de abertura é realizada sem variação na abertura do distribuidor. A abertura da máquina pode ser ajustada na regulação da abertura do distribuidor por meio do ajuste de abertura. Já o botão "REGULAÇÃO DE POTÊNCIA" efetua a comutação para regulação de potência. Essa comutação só é possível com o disjuntor do gerador fechado e em operação interligada. A transição para regulação de potência é feita sem variações e sem modificação da abertura do distribuidor.

Para controle de alarmes existe o botão "PÁGINAS DE ALARMES", para comutação com a página de alarmes. Todos os alarmes pendentes são listados e se algum alarme estiver presente e ainda não foi reconhecido, o LED neste botão permanece piscando. O primeiro alarme que ocorrer ou o último ocorrido são mostrados na tela principal. Há também contatos para indicação externa. Se este botão for acionado mais uma vez, a página é comutada para o buffer de alarmes ocorridos. Todos alarmes são mostrados no buffer em ordem cronológica. Este buffer pode ser facilmente apagado.

Existe ainda a página de eventos que mostra todos eventos ocorridos em ordem cronológica. Um evento difere de um alarme, pois este apenas informa uma condição normal de funcionamento da máquina, enquanto que um alarme informa uma anomalia. Com o botão "RECONHECIMENTO" confirma-se o reconhecimento de todos os alarmes de defeitos e se restabelece o estado anterior. Se o defeito ainda estiver presente, a confirmação de reconhecimento não é possível.

Ao comutar a chave "ENTRADA DE PARÂMETROS" passa a ser habilitada à alteração de parâmetros. A tecla "ALARMES" ativa a tela de manutenção de alarmes. Já a tecla "DATA/HORA" mostra a data e hora atual no canto superior direito da tela por alguns segundos.

Um amplificador de saída é usado para o controle do conversor eletro-hidráulico. Nesse amplificador o ponto de regulação da abertura é comparado com o valor real da abertura. Dependendo da diferença, a válvula proporcional é operada por meio de uma amplificação ajustável (sistema de controle de posicionamento). Além disso, uma corrente alternada é superposta ao sinal, evitando atrito estático na válvula. Um controle adicional de loop para a posição da válvula de controle principal também é implementado neste amplificador. Os dispositivos necessários para medição e detecção de sinais (velocidade, posição, etc.) estão localizados na máquina ou em sua proximidade. É possível que alguns amplificadores ou transdutores sejam integrados no cubículo do regulador.

A alimentação do regulador é feita de forma redundante, ou seja, existem dois conversores DC/DC de 125 Vcc/24 Vcc conectados em paralelo. Caso haja alguma falha em um dos conversores, o outro assume instantaneamente toda a carga, sem causar interrupção no funcionamento do regulador.

Os amplificadores isoladores usados têm uma isolação galvânica entre a entrada e a saída e opcionalmente entre a alimentação e a entrada e saída. A saída não tem efeito sobre a entrada.

Sensores indutivos de proximidade associados a um disco dentado servem para detecção da velocidade. Para um funcionamento correto, a distância entre sensor e dente deve ser de 1 ± 0,2 mm. A fixação dos sensores deve ser verificada regularmente. Na rotação nominal, a freqüência gerada é de 120 Hz. Um conversor freqüência-corrente que gera uma saída de 4 a 20 mA atua como transdutor de velocidade. Será utilizado um módulo contador no CLP que recebe os pulsos diretamente de uma das sondas de rotação.

Dois transdutores capacitivos de medição angular são empregados como transmissores da posição do distribuidor. Se um dos transdutores falhar, o regulador comutará para o segundo transmissor. A posição fechada corresponde a um sinal de 4 mA e a posição totalmente aberta corresponde a um sinal de 20 mA. Dois

potenciômetros são acessíveis depois de aberta a tampa da carcaça, para calibração da faixa de sinal. Uma vez que os potenciômetros tem influência mútua, o balanceamento deve ser repetido várias vezes. Antes disso, deve-se ajustar o eixo do transmissor de posição de modo que a abertura do distribuidor provoque um sinal crescente. Opcionalmente, em casos especiais, pode ser utilizado um transdutor linear de deslocamento acoplado diretamente no servomotor. O regulador é provido também de um transdutor para medição de potência. O transdutor de potência usa três entradas de corrente e três entradas de tensão. A saída do transdutor de potência é um sinal de corrente de 4 a 20 mA, correspondente a potência gerada pela máquina.

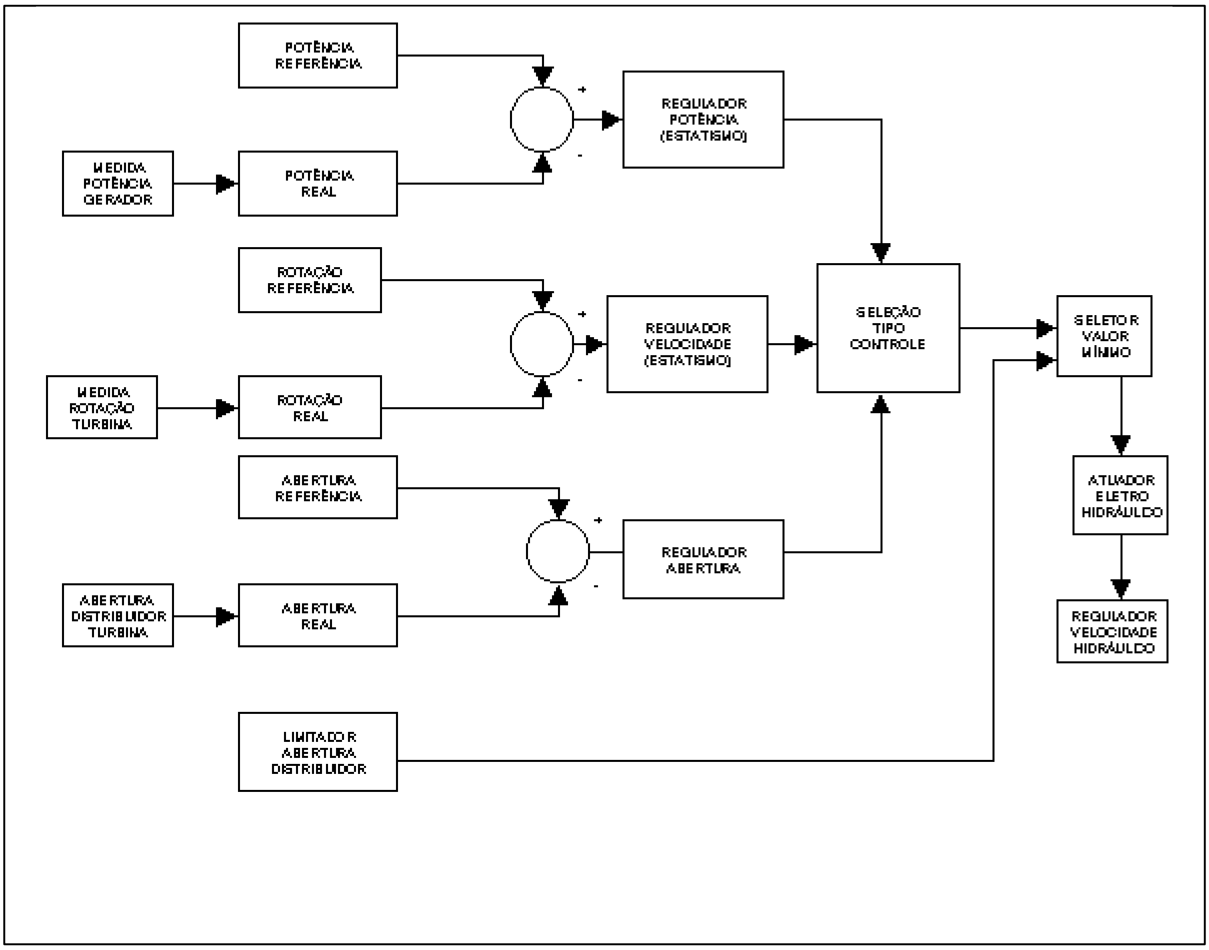
A medição de freqüência da rede só é utilizada na partida automática da máquina, levando o ajuste de velocidade para um valor correspondente a freqüência da rede. Já a medição do curso da válvula de comando é necessária para o caso onde a servo-válvula é equipada com a realimentação intermediária da posição da válvula de comando. Para esta função está previsto um transdutor de posição linear de deslocamento diretamente acoplado ao embolo da válvula de comando.

Um relé de velocidade independente ao CLP faz a monitoração do sinal de sobrevelocidade. Este dispositivo fornece ainda uma referência analógica da rotação que é usada para o caso de falha na medição digital de rotação. O detector de movimento indevido é um dispositivo capaz de detectar pequenos movimentos angulares do eixo após parada total da unidade.

Sinais digitais de entrada e saída são isolados por meio de optoacopladores e relés. Os sinais analógicos (sinais de corrente) são desacoplados por amplificadores isoladores. Para o controle local manual de manutenção de ajuste de abertura do distribuidor, existe uma chave instalada no cubículo do regulador. A abertura do dispositivo de posicionamento acompanha a posição de um comando linear de ajuste de regulação, independente do ajuste de regulação do regulador, este ajuste permite posicionar o distribuidor em qualquer posição entre

zero e 100%. Neste modo, não há regulação de velocidade, regulação de potência e limitações devendo ser utilizado somente em manutenção.

FIGURA 03 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CIRCUITO ELETRÔNICO



FONTE: ANOTAÇÕES DE AULA
NOTA: DISCIPLINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA - CEFET-PR

2.3 MODOS DE REGULAÇÃO

O regulador de velocidade considerado é um regulador do tipo P.I.D. ajustado por parâmetros (os parâmetros do regulador são variáveis de acordo com a condição de operação). Para o regulador digital estudado segundo ESTEVE e BENTO JUNIOR (2000) há três conjuntos de parâmetros: para operação em vazio, operação isolada e operação em paralelo na rede.

O conjunto de parâmetros é formado por estatismo permanente, estatismo

transitório, constante de tempo de amortecimento, ganho derivativo e constante de tempo derivativo.

2.3.1 Regulação de Velocidade

O parâmetro ajustado para operação em vazio é sempre efetivo quando o disjuntor do gerado está aberto. A comutação manual de operação isolada para operação interligada é possível se o disjuntor do gerador estiver fechado. A comutação automática de operação interligada para operação isolada é efetuada se a faixa permitida ajustável de freqüência for ultrapassada ou o disjuntor abrir.

Na seleção de mínimo, o valor de saída do regulador de velocidade é comparado com a limitação de abertura, sendo o menor valor a saída para regulação do posicionamento. Com outro modo de regulação, o circuito de regulação de velocidade não é efetivo, entretanto, o ajuste de regulação da velocidade acompanha de acordo com o estatismo permanente, ajustado de forma que na comutação para regulação de velocidade a abertura do distribuidor é inicialmente mantida. Além disso, a saída do circuito de regulação de velocidade acompanha a abertura do distribuidor de forma que a comutação se faz sem variações.

2.3.2 Regulação de Abertura

A regulação de abertura corresponde a introdução de um ajuste de regulação na malha de controle de posicionamento do servomotor do distribuidor. No caso de regulação de abertura ligada, em operação interligada, o distribuidor acompanha diretamente este ajuste de regulação. Durante o procedimento de partida, o distribuidor acompanha o ajuste de regulação com duas aberturas.

Durante a partida da turbina, o valor da regulação de abertura é comparado com aquele do regulador de velocidade, e o menor desses valores é

transferido para o ponto de regulação do distribuidor (seleção de mínimo). A regulação de abertura é realizada de forma que ela seja válida como uma limitação de abertura nos outros modos de regulação.

2.3.3 Regulação de Potência

Para a regulação de potência existem três condições que são o disjuntor do gerador fechado, rotação da unidade na faixa admissível e sinal do transdutor de potência disponível. Se o disjuntor do gerador estiver fechado e a freqüência estiver dentro da faixa admissível, a regulação de potência pode ser ativada a partir de todos os outros modos de operação por meio da tecla "Potência". Após um procedimento de partida a comutação para regulação de potência é feita automaticamente, se o parâmetro correspondente estiver ajustado.

O ajuste de regulação de potência pode ser mudado por meio de alteração do valor desejado. O valor de saída da regulação de potência é determinado pela comparação do ajuste de regulação de potência com o valor real da mesma, através de uma regulação PI. Os parâmetros de regulação, estatismo e constante de tempo de amortecimento são valores fixos que podem ser alterados via parâmetros pelo regulador. Para se obter uma resposta rápida da turbina em caso de modificação do ajuste de regulação de potência, desenvolve-se uma curva de pré-comando de regulação de potência em função da abertura do distribuidor. A regulação propriamente dita deve apenas controlar a imprecisão desta curva. A característica da curva de pré-comando consiste em uma curva com 10 suportes, entre as quais se faz uma interpolação linear.

Se estiver ligada a regulação de velocidade ou regulação de abertura, estará em vigor um acompanhamento do ajuste de regulação de potência, de modo que na comutação para regulação de potência a abertura do distribuidor é inicialmente mantida. Além disso, a saída do circuito de regulação de potência

acompanha a abertura do distribuidor, de modo que a comutação é feita sem variações bruscas.

O desvio da velocidade medida da máquina em relação à velocidade nominal é superposta à regulação de potência, sendo o grau variável de influência da freqüência definido pelo estatismo potência/freqüência ajustável (ás vezes chamado de regulação permanente de velocidade). Devido a esse estatismo potência/freqüência, a máquina contribui para a estabilidade da freqüência da rede.

2.3.4 Limitações de abertura e potência

A abertura do distribuidor pode ser limitada por um limite máximo fixado (parâmetro). Além disso, é feita uma limitação mínima (limitação de fechamento), que tem efeito com o disjuntor do gerador fechado e durante a operação interligada.

O limite de abertura pode ser ajustado como desejar, por exemplo, o limite de carga do gerador, mas normalmente é colocado em 100%. A limitação permanece ativa em todos os modos de regulação, inclusive durante a partida da máquina. A potência elétrica da máquina pode ser limitada a um valor máximo através do limitador de potência que é ajustado através de um parâmetro. Esta limitação é efetiva em qualquer modo de operação. Porém, durante o processo dinâmico (rápidas aberturas do distribuidor) o limite pode ser excedido por curtos períodos de tempo.

Quando o disjuntor do gerador está fechado, o regulador pode operar como compensador síncrono através de comando remoto. O distribuidor será fechado completamente. Após a remoção do comando remoto, o distribuidor será aberto rapidamente até uma reabertura pré-definida, que pode ser ajustada por entrada de parâmetro. Essa reabertura vale por um intervalo de tempo pré-ajustado. Em seguida o regulador comuta automaticamente para regulação de velocidade ou, dependendo de um parâmetro, comuta para a regulação de potência.

2.4 FUNÇÕES ADICIONAIS REGULADOR VELOCIDADE ELETRÔNICO

O sistema de operação e monitoração do regulador digital considerado para este estudo permite que o operador emita os comandos através de um teclado multifuncional específico. O operador deve navegar facilmente pelas telas do sistema, examinando tendências das variáveis principais, parâmetros do regulador e registro das atuações dos alarmes por ele emitidos. Dependendo do nível operacional, além das funções de controle já descritas anteriormente, pode-se com o regulador digital efetuar a partida e parada da máquina, alterar parâmetros deste regulador e acompanhar alarmes de falha.

2.4.1 Partida e Parada

No caso de liberação para partida (entrada remota "PRONTO PARA PARTIR") e "REGULADOR OK", a partida automática é iniciada por um comando de partida local ou remoto. O distribuidor abre até a abertura de partida I. Quando uma velocidade de 80% é alcançada, o distribuidor é comandado para abertura de partida.

Depois de alcançada a velocidade síncrona, o sinal para liberar a unidade de sincronização é enviado. Isto é feito com um retardo, de modo que os impulsos de sincronização não influenciem o ajuste de regulação de velocidade demasiado cedo. O ajuste de regulação da velocidade é diminuído inicialmente de um certo valor, em relação ao ajuste de regulação síncrono. Quando a velocidade da turbina alcança o ajuste de regulação, a regulação de velocidade assume daí em diante a regulação do distribuidor e opera a turbina através de uma função de rampa, até a velocidade síncrona.

Por meio de impulsos do sincronizador para as entradas correspondentes, o ajuste de regulação da velocidade é ajustado até que o gerador possa ser ligado na rede.

Quando a informação "DISJUNTOR DO GERADOR FECHADO" é recebida, o regulador comuta para operação interligada, completando o processo de partida. Se o parâmetro correspondente estiver ajustado, ocorre a comutação automática para o modo de regulação desejado.

A parada da turbina é iniciada pelo botão de comando "PARAR", o distribuidor é fechado com velocidade ajustável, até a posição em vazio. Em seguida, o distribuidor é fechado com máxima velocidade de posicionamento, até a posição fechada. Mediante manutenção da válvula de controle na direção de fechamento, o distribuidor é mantido fechado mesmo contra pressão de água. Após atingida a posição em vazio, um sinal é enviado permitindo a abertura do disjuntor da rede. Em caso de defeito onde se faz necessário o fechamento total e imediato do distribuidor, é acionada a entrada "PARADA DE EMERGÊNCIA".

2.4.2 Entrada de Parâmetros

Sem uma unidade de programação, este equipamento permite a indicação de valores base, valores limites ou parâmetros e suas variações. Através da tecla Parâmetros, ativamos a tela correspondente. Os parâmetros com seus respectivos valores são listados na tela em uma tabela de dez parâmetros. A tabela de parâmetros pode ser selecionada em uma determinada faixa através da entrada do endereço do parâmetro desejado ou através das teclas subir/descer. Se necessário um novo valor pode ser ajustado. Para isso, entra-se com o número do parâmetro a ser ajustado no campo de entrada e pressiona-se "ENTER". Logo após, seleciona-se com as teclas do cursor o campo de entrada dos valores, digita-se o novo valor desejado para o parâmetro indicado e pressiona-se "ENTER". Para transferir o novo valor para o CLP, pressiona-se a tecla "CONFIRMAÇÃO". A transferência só será possível se a chave "ENTRADA DE PARÂMETROS" estiver na posição que habilita a alteração. O novo valor é então mostrado na lista de parâmetros presente

na tela. Os parâmetros assim ajustados são mantidos mesmo no caso de falta de tensão. Se a queda de tensão ocorrer durante um longo período de tempo, em caso de nova partida, são carregados os valores deixados na EPROM durante o comissionamento. Se os valores modificados tiverem que ser armazenados na EPROM, ela deverá ser reprogramada.

O regulador da turbina forma vários valores limites exigidos pelo sistema de controle da central hidrelétrica e os envia através de relés de isolação. Todos os valores limites podem ser variados através de entrada de parâmetros.

2.4.3 Monitoração

Todos os sinais analógicos introduzidos no regulador são monitorados para verificação da falta de sinal, isto é, se um sinal de entrada cair abaixo de um valor mínimo pré-definido, o regulador gera um sinal de falha.

O sinal de velocidade medido é verificado em função da abertura do distribuidor, isto é, se o servomotor está aberto por um período de tempo bem definido, deve existir um sinal de velocidade. Se a velocidade permanecer nula, é gerado um sinal de saída de defeito (falha de detecção de velocidade).

Além disso, o sinal de defeito é ativado se a saída "watchdog" do módulo contador ficar desenergizada, ou se o sinal de velocidade cair abaixo de 70% com o disjuntor do gerador fechado. Os dispositivos de medição de velocidade independentes do CLP também são monitorados pelo CLP. Para tanto, os sinais analógicos gerados pelos dispositivos separados são introduzidos no CLP e monitorados quanto a falha de sinal.

O desvio entre a realimentação da posição real do distribuidor e o ajuste de regulação da posição gerado pelo CLP é monitorado. Se o desvio permanecer maior que 5% durante um período de tempo pré-definido, é emitido o sinal de falha de controle de abertura. Essa falha pode ser causada por um defeito elétrico ou

hidráulico no circuito de controle piloto.

Os seguintes sinais de falhas são reconhecidos pelo regulador da turbina e são enviados como saídas de sinais de falhas, externamente, através de contatos livres de potencial:

a) falha em ambos CLP`S ou em apenas um;
b) falha no transdutor de posição;
c) falha no controle de abertura;
d) falha no sensor de rotação;
e) sobrevelocidade primeiro nível;
f) sobrevelocidade segundo nível;
g) falha no conversor DC/DC;
h) detecção de movimento indevido da turbina;
i) falha no sinal de freqüência da rede;
j) falha no transdutor de potência;
l) falha na alimentação válvula de controle;
m) outros.

2.5 ESTATISMO

O estatismo é uma função que permite ao regulador acionar a abertura do distribuidor proporcionalmente à queda de velocidade ou freqüência. No sistema elétrico brasileiro o estatismo de todos os reguladores é ajustado em 5%, com isso, se a freqüência ou rotação tiver uma queda de 5% o distribuidor receberá do regulador uma ordem de abertura de 100%. O estatismo responde também no sentido de acionar o fechamento do distribuidor se a freqüência aumentar em 5%.

Essa característica garante que todas as máquinas respondam à queda de velocidade proporcionalmente a sua potência nominal. Esta resposta automática do regulador à variação de freqüência é denominada regulação primária de velocidade.

Esta regulação primária propicia o atendimento de demanda, mas isto se dá as custas de uma variação na freqüência do sistema. O valor estático de freqüência, embora limitado é inaceitável, uma vez que há série de restrições à operação com sub-freqüência ou sobre-freqüência. É necessário, portanto, a existência de um controle suplementar que faça a freqüência retornar ao valor original.

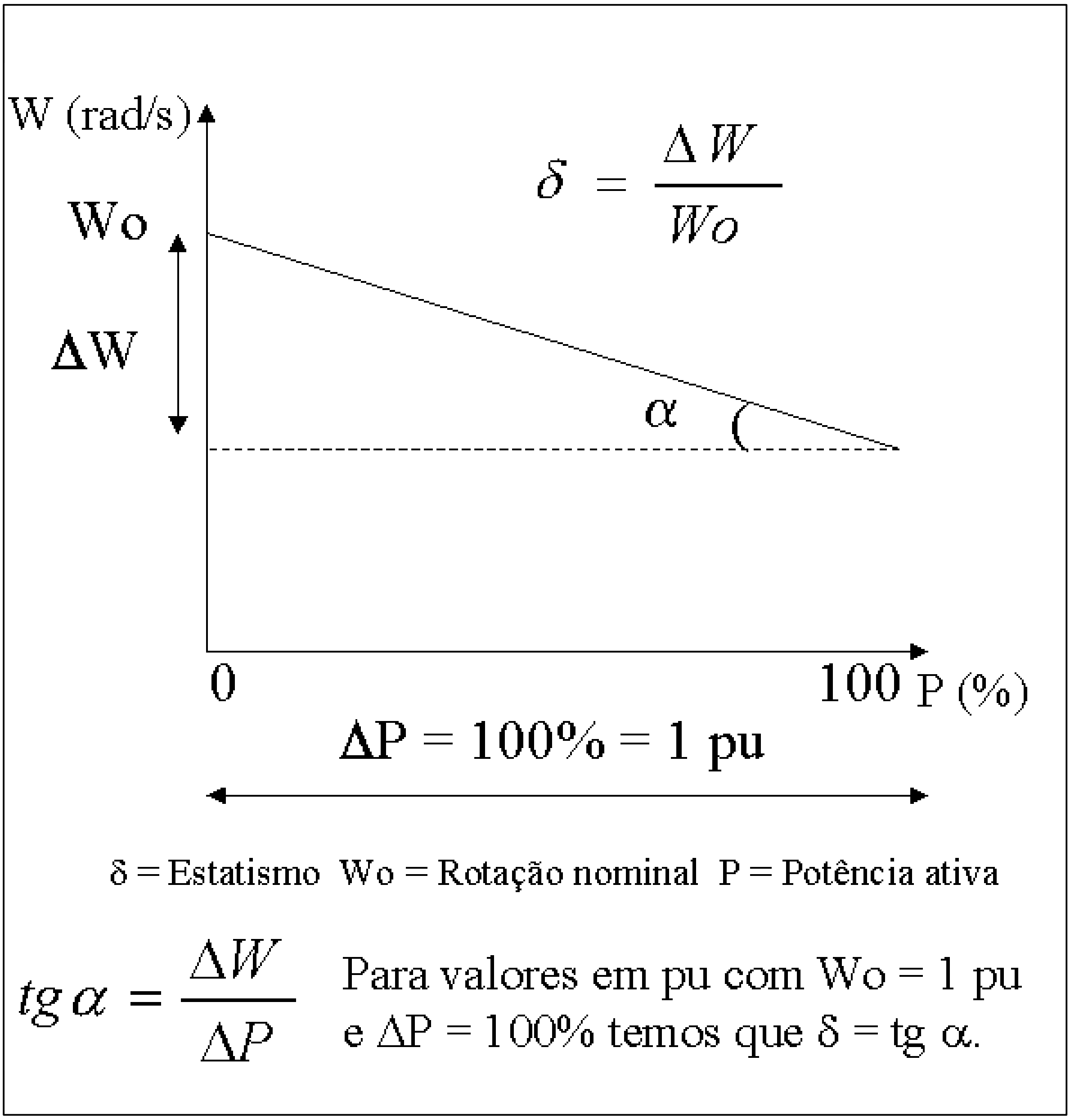
Este controle atua na referência dos reguladores de velocidade com o objetivo de corrigir o desvio de freqüência que resulta quando apenas o controle primário atua. Este controle suplementar é denominado regulação secundária de velocidade.

De acordo com o estatismo temos o regulador isócrono e o regulador com queda de velocidade. O estatismo do regulador pode ser definido como a relação entre a variação de rotação e a rotação nominal da máquina. Podemos avaliar isto pelo gráfico da figura 4.

Podemos definir então que estatismo é a inclinação da reta, pois $\sigma = \text{tg}\ \alpha$. Para $\sigma = 0$, temos o regulador isócrono conforme a curva da figura 5. No regulador isócrono para qualquer abertura do distribuidor temos a máquina operando na rotação nominal, entretanto na prática não é utilizado, pois apresenta muitos inconvenientes.

No regulador com queda de velocidade a máquina opera ainda com rotação nominal para as diferentes aberturas do distribuidor só que ocorre um deslocamento paralelo da reta com a mesma inclinação σ como mostra a figura 6. A característica do estatismo garante a distribuição adequada de carga entre todas as máquinas em paralelo com o sistema elétrico quando ocorrer uma variação desta carga.

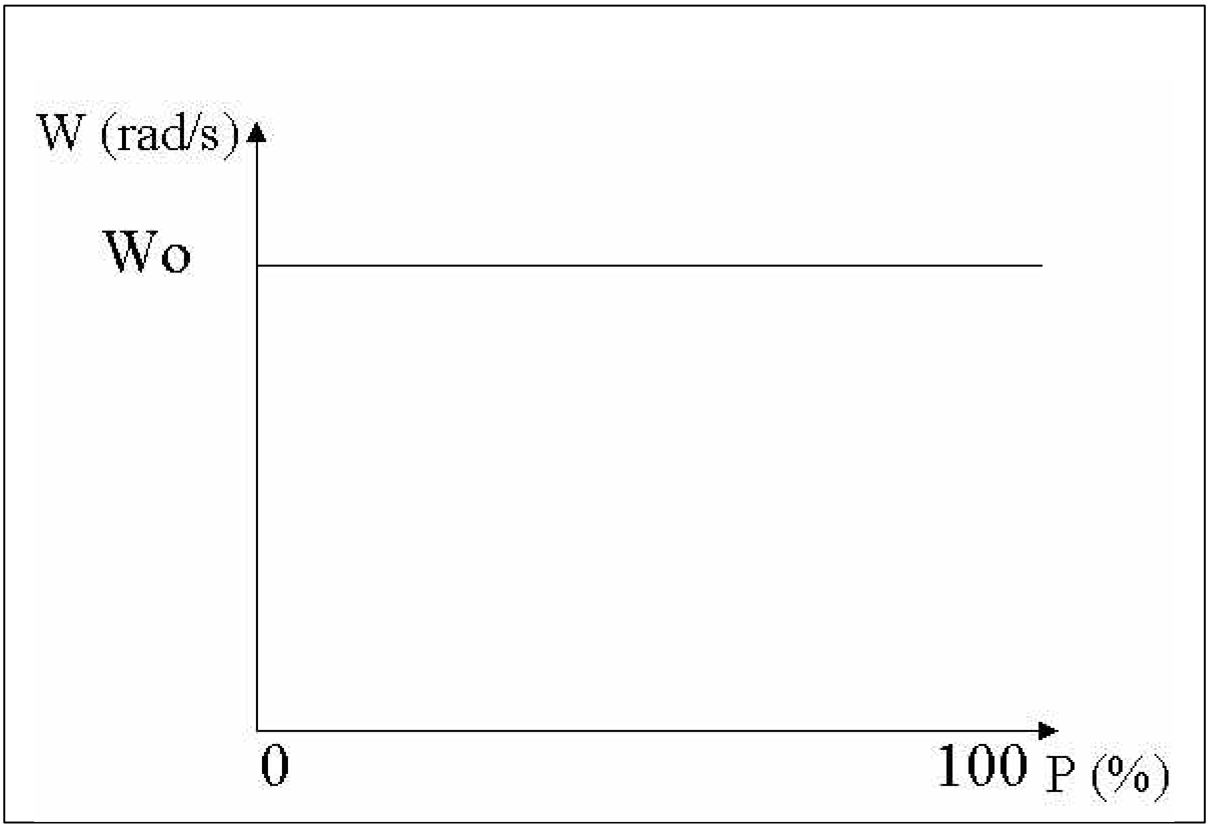
FIGURA 04 - CURVA ESTATISMO



FONTE: ANOTAÇÕES DE AULA

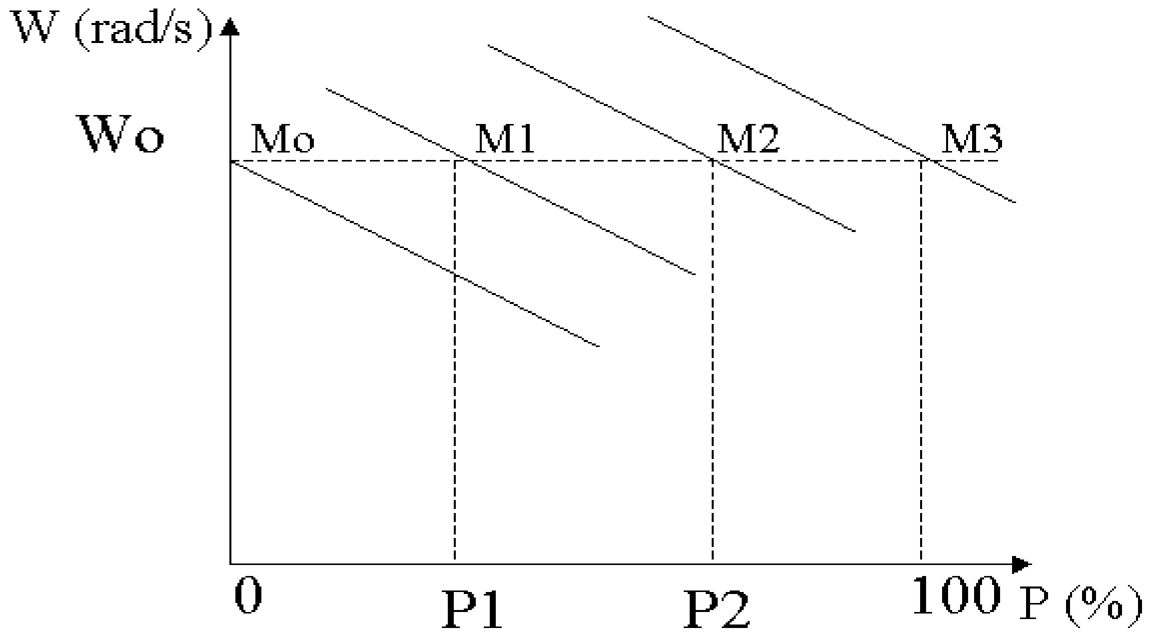
NOTA: DISCIPLINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA - CEFET-PR

FIGURA 05 - CURVA ESTATISMO REGULADOR ISÓCRONO



FONTE: ANOTAÇÕES DE AULA
NOTA: DISCIPLINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA - CEFET-PR

FIGURA 06 - CURVA ESTATISMO REGULADOR COM QUEDA DE VELOCIDADE



Os pontos de operação indicados são:

Mo: P =0, marcha em vazio

M1: P=P1, carga qualquer

M2: P=P2, carga qualquer

M3: P=100%, carga máxima

Em todos os casos têm-se a rotação nominal, independente do valor de abertura.

FONTE: ANOTAÇÕES DE AULA
NOTA: DISCIPLINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA - CEFET-PR

3 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Com a definição do diagrama em blocos do circuito hidráulico e do circuito eletrônico do regulador de velocidade foi possível a realização do estudo detalhado do funcionamento básico de cada bloco. Com estes dados, utilizando-se o software VisSim® versão 3.0E acadêmica, foi elaborado separadamente cada bloco, de forma que pudesse vir a representar o funcionamento do mesmo através de equações matemáticas e variáveis.

VisSim® é um programa, que pode ser rodado no Windows®, utilizado para modelar e simular sistemas dinâmicos lineares e não-lineares contínuos, discretos e híbridos. Com este programa pode-se construir modelos de sistemas sob forma de diagrama de blocos, usando comandos familiares pelo mouse. Através desta modelagem as conexões entre os elementos do sistema são definidas via portas, nas quais devem ser especificadas as variáveis de estado do sistema, sendo que cada conexão corresponde a apenas uma variável, o que naturalmente torna mais complexa a modelagem do sistema. Blocos e ligações entre eles são as ferramentas básicas. Cada bloco corresponde a uma função lógica ou matemática específica, ou também pode ser uma variável de entrada ou várias saídas como gráficos, medidas e sinalização. A função pode ser simples como uma senóide ou complicada como uma função de transferência, o programa fornece dezenas de blocos com suporte linear e não linear. A relação visual do diagrama de bloco oferece um método simples para construir, modificar e manter modelos de sistema.

O método de simulação fornece soluções rápidas e exatas para o tempo linear, não-linear, contínuo e tempo discreto dos sistemas analisados. O VisSim® fornece um ambiente inteiramente integrado do sistema de controle, onde todas as tarefas e condições de simulação podem ser especificadas sem escrever uma linha do código. Quando o VisSim® simula um modelo, ele resolve numericamente as equações que definem o sistema e calcula a saída do mesmo. Se variarmos os

parâmetros do sistema, o programa calcula imediatamente as modificações e as inclui na simulação. Para resolver equações diferenciais, o programa dispõe de vários algoritmos de integração, tais como Euler e Runge-Kutta, os quais apresentam um compromisso entre precisão e rapidez.

A simulação de cada bloco foi realizada separadamente. Após todos os blocos satisfazerem as condições de funcionamento durante a simulação, houve a interligação destes blocos, sempre respeitando os requisitos e prioridades de cada um, onde foi possível simular o funcionamento completo do regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis.

3.1 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO HIDRÁULICO

Para o circuito hidráulico serão descritas a seguir, as variáveis envolvidas, condições para operação de cada bloco, operações matemáticas envolvidas e equações de cada bloco. Vale lembrar que para fins didáticos as grandezas envolvidas foram simuladas em valores percentuais.

A bomba de óleo deve fornecer óleo para o circuito hidráulico. Para elaboração deste bloco, foram utilizadas portas lógicas OR, AND e NOT a fim de simular o contator de partida do motor. Ainda foi elaborado um bloco temporizador para simular o tempo de partida do motor, que no caso ficou definido em 5s devido as condições iniciais de acionamento de um motor.

Duas chaves para efetuar o comando de ligar e desligar da bomba foram adicionadas. Um sinalizador luminoso mostra o estado de operação da bomba. A variável de saída deste bloco ficou definida como 42B1. Esta variável será uma pré-condição para acionamento da válvula de descarga e da válvula de acionamento.

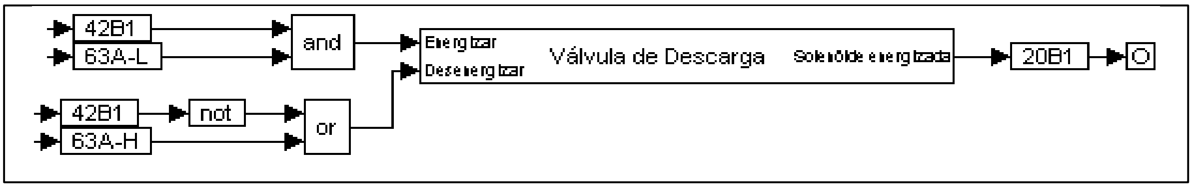
FIGURA 07 - BOMBA DE DESCARGA



FONTE: O AUTOR

A válvula de descarga deve garantir a partida da bomba sem pressão. Após o tempo de partida da bomba esta válvula é acionada de forma intermitente pela pressão de óleo do acumulador, isto é, se a pressão atinge um valor limite superior um solenóide é desenergizado e o óleo fica circulando em baixa pressão para o tanque com a finalidade de resfriamento. Quando a pressão do acumulador cai a um valor limite inferior esta válvula é energizada para pressurização até o limite superior. Este funcionamento intermitente que garante o funcionamento contínuo da bomba de óleo enquanto a máquina estiver funcionando. Para energização da válvula de descarga, a bomba deverá estar ligada (variável 42B1) e a pressão deverá estar com o valor do limite inferior (variável 63A-L). A desenergização será possível somente se a bomba estiver desligada ou a pressão estiver com o valor do limite superior. Foi utilizado um bloco set/reset para memória do comando de energização e um temporizador para simular o tempo de energização do solenóide, no caso 1s. Um sinalizador luminoso mostra o estado de operação desta válvula.

FIGURA 08 - VÁLVULA DE DESCARGA



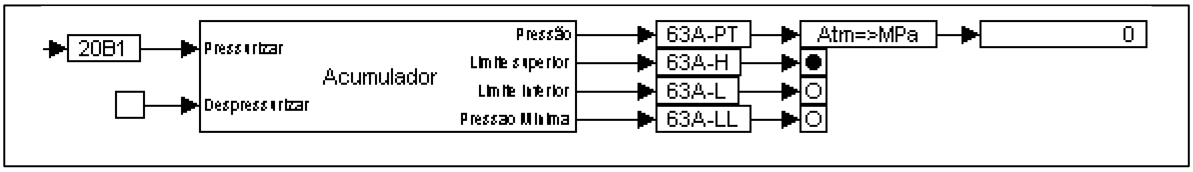
FONTE: O AUTOR

O acumulador tem por função manter a pressão do óleo para acionamento do servomotor quando falta tensão alternada para a bomba de óleo, o que garante a parada segura da máquina mesmo com a bomba desligada. Foi elaborado um bloco de set/reset para simular a pressurização do acumulador. A despressurização do acumulador ocorre automaticamente quando há movimentação do servomotor, estando a bomba de óleo em processo de descarga. O comando de pressurização é dado pela saída da válvula de descarga que foi definida por 20B1.

Para simular o tempo de pressurização e estabelecer os limites de variação de pressão no acumulador foram utilizados um bloco merge, um integrador,

um divisor e três comparadores. Foram definidos que os limites de pressão estão entre 60 e 80% da pressão máxima e que a pressão mínima está em 50%. As variáveis de saída são 63A-PT para indicação da pressão de saída, 63A-H para indicação de limite superior de pressão, 63A-L para indicação de limite inferior de pressão e 63A-LL para indicação de pressão mínima. Para cada variável foi inserido um sinalizador luminoso para mostrar qual a faixa de operação do acumulador, sendo que esta faixa foi definida entre 0,4 MPa (40%) e 0,8 MPa (80%). Para ensaio foi inserido, um mostrador analógico para indicação do valor numérico de pressão. As variáveis do acumulador são pré-condições para acionamento da válvula de descarga, válvula de isolamento e eletro-válvula de emergência.

FIGURA 09 - ACUMULADOR



FONTE: O AUTOR

A válvula de isolamento deve evitar a fuga de óleo do acumulador quando a máquina está parada e as bombas desligadas. Quando a máquina está funcionando a válvula de isolamento não poderá ser fechada, pois não haverá óleo para comandar o servomotor. Para abertura da válvula de isolamento a bomba deverá estar ligada e a pressão deverá estar entre os valores limites. Para fins didáticos foi utilizada uma chave para simular a eletro-válvula de comando. Já para o fechamento da válvula de isolamento foi considerado que o servomotor deverá estar fechado (variável 33SM-F) e que a trava hidráulica esteja aplicada (variável 33TH-A). Para simulação desta válvula foram utilizados um bloco set/reset, um bloco merge, um divisor, um integrador e dois comparadores. O bloco divisor serve para simular o tempo de abertura e fechamento da válvula de isolamento. As variáveis de saída são 33VI-A para indicação de abertura da válvula e 33VI-F para fechamento. Foi inserido um display para visualização da posição de abertura da

válvula e dois sinalizadores luminosos para mostrar o estado de operação.

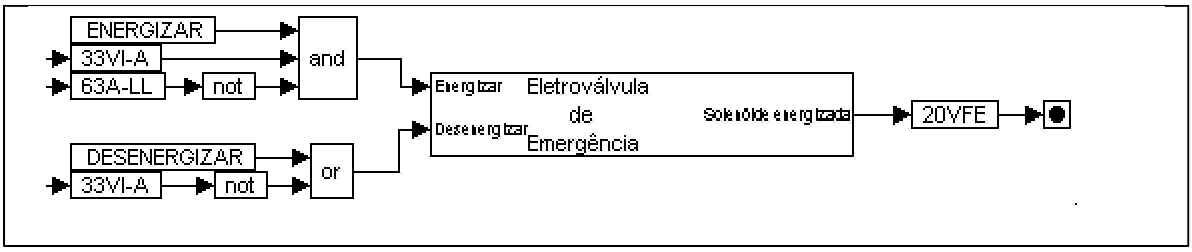
FIGURA 10 - VÁLVULA DE ISOLAMENTO



FONTE: O AUTOR

A eletro-válvula de emergência deve desbloquear hidraulicamente o regulador de velocidade para a partida e funcionamento da máquina. Se atuar numa parada de emergência ou mesmo numa parada normal ela é desenergizada provocando o fechamento hidráulico do servomotor. Para energização desta eletro-válvula que é feita por uma chave é necessário que a válvula de isolamento esteja aberta (variável 33VI-A), que a pressão mínima seja superada (variável 63A-LL). A desenergização é dada por uma chave ou se a válvula de isolamento estiver sendo fechada (variável 33VI-F). A variável de saída é 20VFE. Para simulação desta eletro-válvula foram utilizados um bloco set/reset e um temporizador. Este temporizador simulou o tempo de energização da eletro-válvula que no caso foi de 0,5s. Foi inserido um sinalizador luminoso para mostrar o estado de operação.

FIGURA 11 - ELETROVÁLVULA DE EMERGÊNCIA

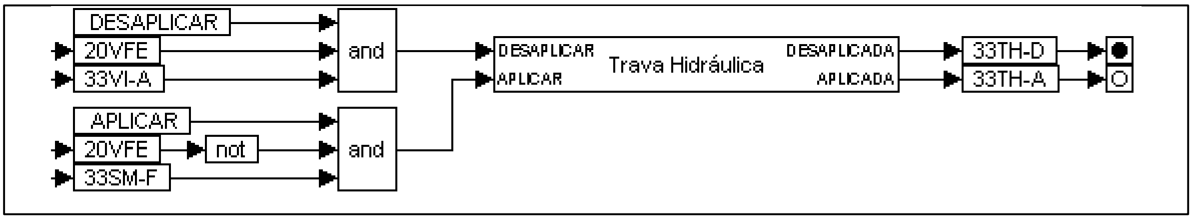


FONTE: O AUTOR

A trava hidráulica deve manter o servomotor travado quando a máquina estiver parada. É um dispositivo de segurança. Para destravamento a eletro-válvula de emergência deverá estar energizada (variável 20VFE) e a válvula de isolamento aberta (variável 33VI-A). Este destravamento é por comando manual. Para o

travamento que é feito por uma chave, a eletro-válvula de emergência deve estar desligada (variável 20VFE) e o servomotor aberto (variável 33SM-F). As variáveis de saída são 33TH-D para indicar que está destravada e 33TH-A para indicar que está aplicada. Para simulação desta trava foram utilizados um bloco set/reset, um bloco merge, um divisor, um integrador e dois comparadores. Um sinalizador luminoso mostra o estado de operação da trava.

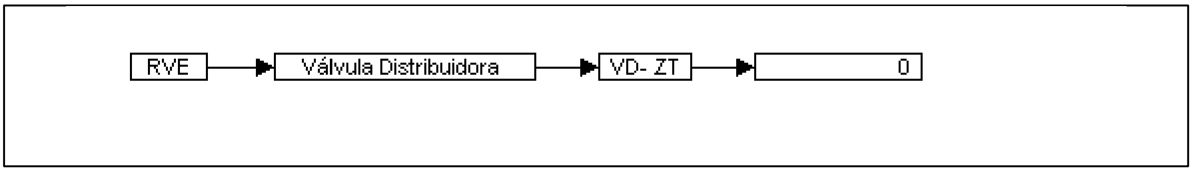
FIGURA 12 - TRAVA HIDRÁULICA



FONTE: O AUTOR

A válvula distribuidora deve fechar e abrir o servomotor. Para acionamento desta válvula foi levado em conta o erro de posicionamento do servomotor que é dado pelas variáveis SM-ZT-REF e SM-ZT e a própria posição da válvula distribuidora que é dada pela variável VD-ZT-REF que vem do circuito eletrônico, com isto o atuador eletro-hidráulico já é considerado. Para a simulação desta válvula foram utilizados um bloco somador, um divisor e um integrador. A constante de tempo de abertura ou fechamento ficou definida em 0,5s.

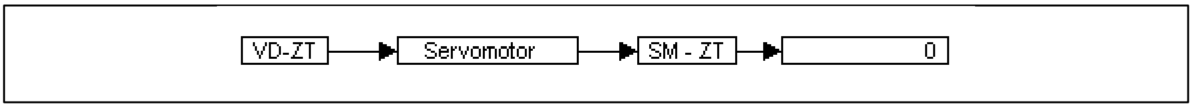
FIGURA 13 - VÁLVULA DISTRIBUIDORA



FONTE: O AUTOR

O servomotor é responsável pela abertura do distribuidor, que permite a entrada de água na turbina. O acionamento do servomotor é dado pela variável VD-ZT que é a saída da válvula distribuidora. Para simulação do servomotor foram utilizados um bloco divisor e um integrador. Um display mostra a posição do servomotor. A saída do servomotor é a variável SM-ZT.

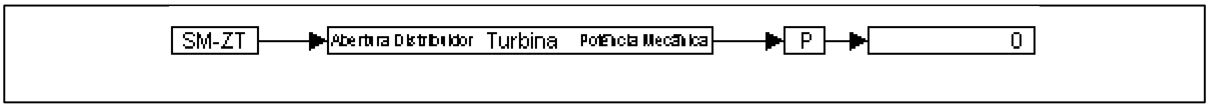
FIGURA 14 - SERVOMOTOR



FONTE: O AUTOR

A turbina deve transformar energia hidráulica em energia mecânica. Esta energia mecânica será transformada em energia elétrica pelo gerador. A variável de entrada da turbina é SM-ZT que vem do servomotor e representa o valor de abertura que o distribuidor deverá ter. O bloco turbina abrange a atuação do distribuidor e faz o cálculo do valor de potência conforme seja o valor de abertura solicitado, para isto é considerado um valor de constante de inércia da água. Para simulação da turbina foram utilizados um bloco divisor, dois blocos somadores e um integrador. Um display mostra o valor de potência mecânica. A saída do servomotor é a variável P.

FIGURA 15 - TURBINA HIDRÁULICA



FONTE: O AUTOR

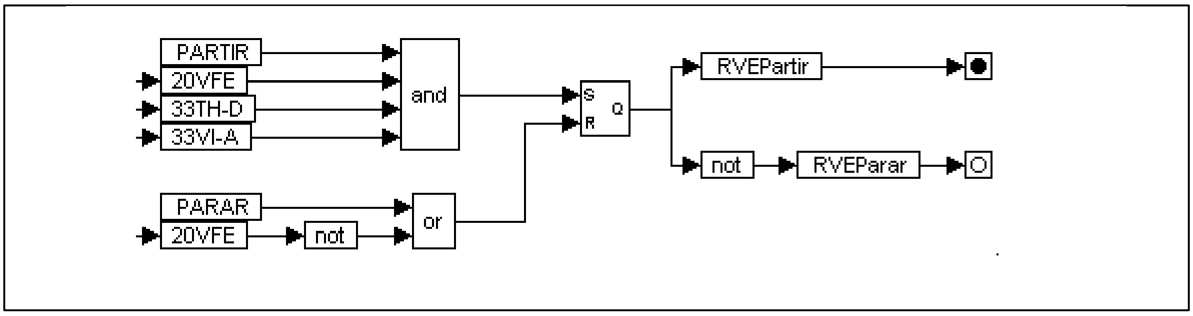
3.2 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

Para o circuito eletrônico serão descritas a seguir, as variáveis envolvidas, condições para operação de cada bloco, operações matemáticas envolvidas e equações de cada bloco. Vale lembrar que para fins didáticos as grandezas envolvidas foram simuladas em valores percentuais.

O acionamento do circuito eletrônico é feito por um bloco de set/reset através de uma chave. Inicialmente deve-se respeitar as condições de funcionamento do circuito hidráulico que são dadas pelas variáveis 20VFE, 33TH-D e 33VI-A que são respectivamente eletro-válvula de emergência energizada, trava hidráulica destravada e válvula de isolamento aberta. Para a saída do bloco

set/reset temos duas variáveis: RVEPARTIR e RVEPARAR. A saída RVEPARTIR habilita o processo de partida e sincronização do bloco SP Limitador de Abertura. Já a variável RVEPARAR está presente em outros blocos do circuito eletrônico e faz com que cause o reset dos mesmos levando-os as condições iniciais de operação. Um sinalizador luminoso mostra a condição de operação do circuito eletrônico. Para desligar o circuito eletrônico existe uma chave ou isto acontece automaticamente se houver falha no circuito hidráulico o que é visto pelo acionamento da eletro-válvula de emergência. Efetivamente esta função, de partir e parar RVE, é que leva a turbina da rotação nula à rotação nominal e da rotação nominal à rotação nula, respectivamente.

FIGURA 16 - PARTIDA CIRCUITO ELETRÔNICO

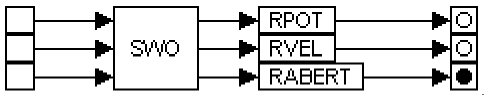


FONTE: O AUTOR

Um bloco SWO foi implementado para chavear o modo de regulação do circuito eletrônico. Através de três chaves ele permite acionar o tipo de regulação: abertura, velocidade e potência. Para simulação deste SWO foram utilizadas portas lógicas OR, NOT e AND, temporizadores, emissores de pulsos e blocos set/reset. Como variáveis internas foram definidas LVEL, LABERT e LPOT que são comparadas para determinar a escolha do tipo de regulação. Na saída temos as variáveis RABERT, RVEL e RPOT indicando a opção escolhida para regulação. Um sinalizador luminoso indica o modo de regulação. Não é possível utilizar mais de um modo de regulação simultaneamente e eles possuem uma função de seguidor para que a comutação de um modo para o outro ocorra, manual ou automaticamente, sem oscilação de potência ou de posição do distribuidor da turbina.

Na partida da turbina é utilizado o modo de regulação de abertura. Após a sincronização da unidade geradora automaticamente assume o modo de regulação de potência. Estando em sincronismo, se o transdutor de potência apresentar defeito ou houver instabilidade desse modo de regulação automaticamente é comutado para o modo de regulação de velocidade. O modo de regulação de abertura só é utilizado em casos de emergência, com a máquina em sincronismo com o sistema, se ocorrer falha dos modos de regulação de potência e de velocidade.

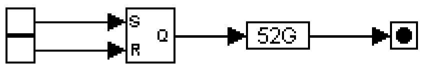
FIGURA 17 - CHAVEAMENTO DO MODO DE REGULAÇÃO



FONTE: O AUTOR

O disjuntor foi simulado através de um bloco de set/reset sendo que a sua variável de saída foi definida como 52G. O acionamento é feito através de chaves. Um sinalizador luminoso indica o estado de operação do disjuntor.

FIGURA 18 - DISJUNTOR



FONTE: O AUTOR

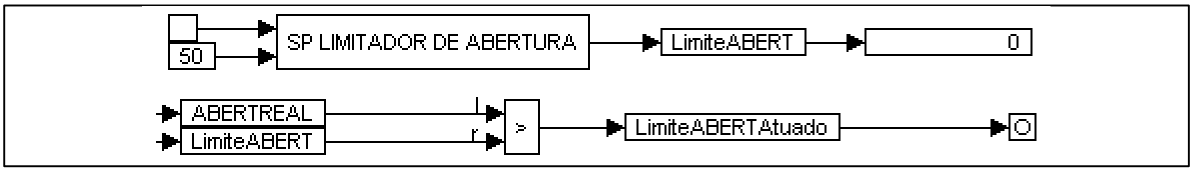
O limitador de abertura do distribuidor foi implementado através do bloco SP Limitador de Abertura. Internamente a este bloco foi criado um bloco de Partida e Sincronização. O bloco Partida e Sincronização tem por função estabelecer inicialmente um limite de abertura de 20% do distribuidor. Este valor de 20% corresponde ao valor de ajuste denominado anteriormente de Partida I e, após a rotação atingir 90 % esse valor é alterado para 10% correspondente à abertura de marcha em vazio, que garante a rotação nominal da unidade geradora. Quando é realizado o sincronismo da unidade com o sistema elétrico, esse valor é alterado

para 100%, permitindo o controle total da abertura do distribuidor, para a tomada de carga. Se por alguma razão, problemas mecânicos de vibração ou faixa operativa proibida devido a cavitação excessiva com a máquina funcionado, este valor pode ser ajustado pelo operador para um valor seguro, que evite esses efeitos citados, por exemplo, 90%. Ele trabalha com as variáveis RVEPARTIR e 52G. A função é evitar que ocorra sobrevelocidade na partida.

Existe uma chave para ajuste de set-point. Os valores de set-point pré-definidos podem limitar a abertura em um valor de 20% na hora da partida e após a conexão com o sistema elétrico podem chegar a 100%.

No caso, de parada do RVE este bloco é resetado através da variável RVEPARAR retornando assim as condições iniciais de operação. Para elaboração deste SP Limitador de Abertura foram utilizados portas lógicas OR, NOT e AND, blocos Merge, um integrador, um divisor e blocos comparadores. A saída deste bloco é a variável LIMITEABERT. Um display indica o valor de limite de abertura do distribuidor. Para saber se o limitador de abertura está atuando foi utilizado um comparador que faz a análise do valor de abertura real que vem do servomotor com o valor da variável LIMITEABERT.

FIGURA 19 - SP LIMITADOR DE ABERTURA



FONTE: O AUTOR

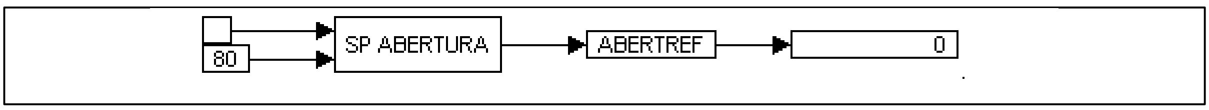
Para estabelecer um valor de referência de abertura foi implementado o bloco SP Abertura. Internamente a este bloco foi criado o bloco Spextabert que tem por função calcular um valor de referência de abertura do distribuidor. Para seu funcionamento ele avalia as seguintes variáveis: ROT que é valor de rotação medido no eixo da turbina, ABERTMarchavazio que foi definida em 10% e 52G que diz respeito ao estado de operação do disjuntor.

Estes valores de referência de abertura limitam em 10% na hora da partida e após a conexão com o sistema elétrico podem chegar a 100% conforme equação 1, que segundo MANCINI FILHO (1985) atende as características de operação de uma unidade geradora. A equação abaixo permite concluir que os valores de abertura igual a zero, 10% e 100% correspondem, respectivamente, às potências ativas de –11,11 (potência reversa na qual a máquina funciona como motor síncrono), zero e 100%. Esta função é linear para facilidades deste trabalho, porém na prática tem a característica não linear. A transformação de não linear em linear e normalmente realizada por uma função linearizadora que não está incluída aqui.

$$ABERTREF = \frac{(POTREAL * 90)}{100} + 10 \qquad (1)$$

Foi também inserida uma chave que permite o ajuste externo de set-point. No caso, de parada do RVE este bloco é resetado através da variável RVEPARAR retornando assim as condições iniciais de operação. Para elaboração deste componente SP Abertura foram utilizadas portas lógicas OR, NOT e AND, blocos Merge, um integrador, um divisor e blocos comparadores. A saída deste bloco é a variável ABERTREF. Um display indica o valor de referência de abertura do distribuidor.

FIGURA 20 - SP ABERTURA



FONTE: O AUTOR

Para estabelecer um valor de referência de velocidade foi implementado o bloco SP Velocidade. Internamente a este bloco foi criado o bloco SPextvel. Para seu funcionamento ele avalia a variável ROT que é valor de rotação medido no eixo da turbina. Estes valores de referência de velocidade devem permitir uma variação de até 5% do valor nominal da velocidade, conforme as equações 2 e 3 que

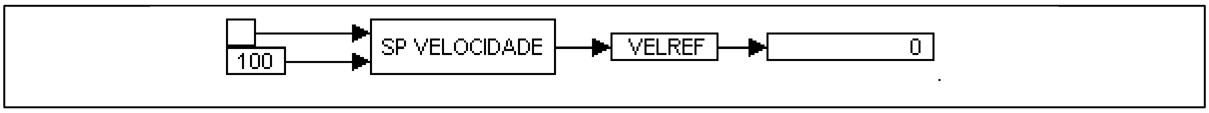
segundo MANCINI FILHO (1985) atendem as características de operação de uma unidade geradora. A equação 2 está de acordo com a característica de estatismo, embora não o seja, com ajuste de 5%, isto é, para abertura de 10%, corresponde à potência ativa igual a zero tem-se VELREF=100% e para a abertura de 100%, que corresponde à potência ativa de 100%, corresponde a VELREF=105%. O mesmo ocorre para a equação 3, isto é, POTREAL=0 corresponde a VELREF=100% e POTREAL=100 % corresponde a VELREF=105%.

$$VELREF = \frac{(ABERTREAL - 10)}{18} + 100 \qquad (2)$$

$$VELREF = \frac{(POTREAL)}{20} + 100 \qquad (3)$$

Foi também inserida uma chave que permite o ajuste externo de set-point. No caso, de parada do RVE este bloco é resetado através da variável RVEPARAR retornando assim as condições iniciais de operação. Para elaboração deste SP Velocidade foram utilizadas portas lógicas OR, NOT e AND, blocos Merge, um integrador, um divisor e blocos comparadores. A saída deste bloco é a variável VELREF. Um display indica o valor de referência de velocidade.

FIGURA 21 - SP VELOCIDADE



FONTE: O AUTOR

Para estabelecer um valor de referência de potência foi implementado o bloco SP Potência. Internamente a este bloco foi criado o bloco SPextpot. Para seu funcionamento ele avalia a variável 52G, verificando se o disjuntor não está desligado. Estes valores de referência de potência devem considerar 10% de potência gasta na partida da turbina, bem como manter a velocidade nominal da máquina constante, independente da quantidade de potência (dentro de sua capacidade) injetada no sistema elétrico, conforme as equações 4 e 5, que segundo

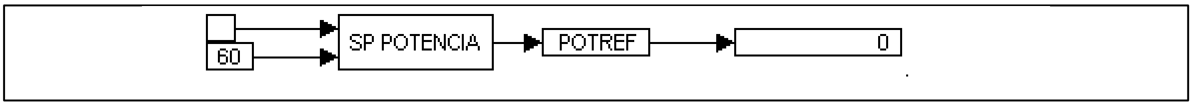
MANCINI FILHO (1985) atendem as características de operação de uma unidade geradora.

$$POTREF = \frac{(ABERTREF - 10)}{9} - \frac{100}{9} \qquad (4)$$

$$POTREF = (VELREF * 20) - 2000 \qquad (5)$$

Foi também inserida uma chave que permite o ajuste externo de set-point. No caso, de parada do RVE este bloco é resetado através da variável RVEPARAR retornando assim as condições iniciais de operação. Para elaboração deste SP Potência foram utilizadas portas lógicas OR, NOT e AND, blocos Merge, um integrador, um divisor e blocos comparadores. A saída deste bloco é a variável POTREF. Um display indica o valor de referência de potência.

FIGURA 22 - SP POTÊNCIA



FONTE: O AUTOR

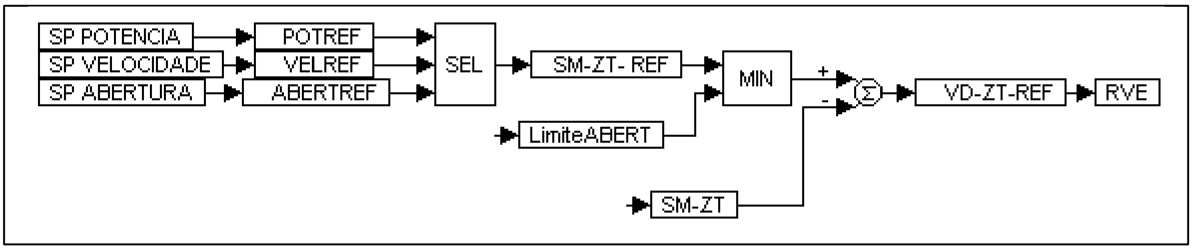
Para simular a seleção do modo de regulação foi implementado o bloco SEL. É este componente que verifica qual o modo de regulação que está em operação e trabalha com o seu respectivo valor de abertura de referência. Em um estágio inicial os valores de POTREF e VELREF são convertidos para ABERTREF conforme as equações 6 e 7, que segundo MANCINI FILHO (1985) atendem as características de operação de uma unidade geradora. Do bloco SP Abertura a saída já está em valor de referência de abertura. Este bloco tem como entradas as saídas do SP Abertura, SP Velocidade e SP Potência.

$$ABERTREF = \frac{(POTREF * 90)}{100} + 10 \qquad (6)$$

$$ABERTREF = \frac{(VELREF - 10)}{18} + 10 \qquad (7)$$

Para elaboração deste SEL foram utilizados blocos Merge e um somador. A saída deste bloco é a variável SM-ZT-REF que é comparado com o limite de abertura através do bloco MIN. Este bloco MIN faz com que a saída seja o menor valor entre os dois. Este valor é somado ao valor real do servomotor SM-ZT e a diferença é a variável VD-ZT-REF. Este valor é encaminhado ao circuito hidráulico para que a válvula distribuidora acione o servomotor a fim de se estabelecer a abertura ou fechamento do distribuidor da turbina hidráulica.

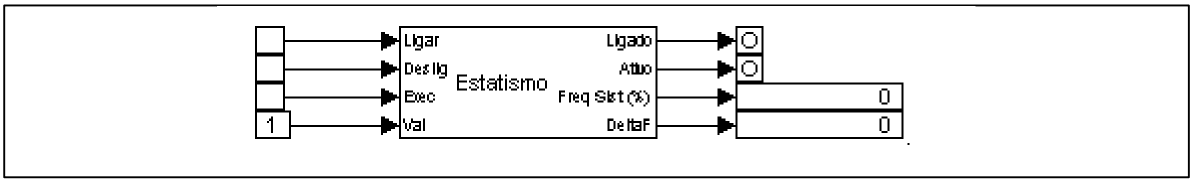
FIGURA 23 - SELEÇÃO MODO DE REGULAÇÃO



FONTE: O AUTOR

O estatismo do regulador foi simulado através do bloco Estatismo. Esta função permite ao regulador acionar a abertura ou fechamento do distribuidor proporcionalmente à queda ou acréscimo de velocidade nominal. Para composição do Estatismo foram utilizados um bloco set/reset, bloco merge, comparador e somador. A sua variável de saída DeltaF atua no bloco SP Velocidade e SP Potência para fazer o ajuste necessário no valor de abertura de referência. Foram inseridas chaves para acionamento e para set-point de valor de estatismo. Dois indicadores luminosos mostram o estado de operação do bloco e dois displays indicam o valor de velocidade e o valor do estatismo.

FIGURA 24 - BLOCO ESTATISMO



FONTE: O AUTOR

Finalizando a parte de simulação do circuito eletrônico, foram inseridos um ploter e um medidor para indicação dos valores de rotação, abertura do distribuidor e potência.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR

Tendo sido realizado o modelamento do regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis no software VisSim® e sendo que o resultado da simulação foi o esperado, o próximo passo a seguir foi a escolha de uma IHM (Interface Homem Máquina) amigável para implementação do simulador. Por ter uma versão DEMO disponível e sua utilização ser de domínio da equipe o software escolhido para integração com o VisSim® foi o Elipse Scada®.

4.1 ELIPSE SCADA

O Elipse Scada® é um software para a criação de aplicativos de supervisão e controle de processos nas mais diversas áreas, oferece um alto desempenho, aliado a poderosos recursos que facilitam a tarefa de desenvolvimento da sua aplicação. Totalmente configurável pelo usuário, permite monitorar variáveis físicas de campo. Além disto, as variáveis do processo podem ser visualizadas de forma gráfica, permitindo em tempo real, uma fácil e rápida compreensão do que está acontecendo. Com este objetivo, vários Objetos de Tela estão disponíveis e pode-se enviar ou receber informações dos equipamentos de aquisição de dados, através de set-points, sliders ou botões.

O Elipse Scada® é composto de três versões distintas, indicadas conforme as necessidades do usuário. Em todas as versões, estão disponíveis: Configurador, Runtime e Master. Estas versões trabalham com aplicações simples, de interface com o operador para monitoração e acionamento até aplicações de qualquer porte, que envolvam comunicação em rede, local ou remota, ou ainda que necessitem de troca de informações entre banco de dados.

O programa Elipse Scada® é sempre o mesmo mas possui um dispositivo de segurança (hardkey) que permite a utilização de algumas das características do software. Sem este dispositivo de segurança, o programa é executado em versão DEMO e permite apenas desenvolver aplicações com até 20 variáveis e execução

por somente 10 minutos.

4.2 ENTRADA DE DADOS

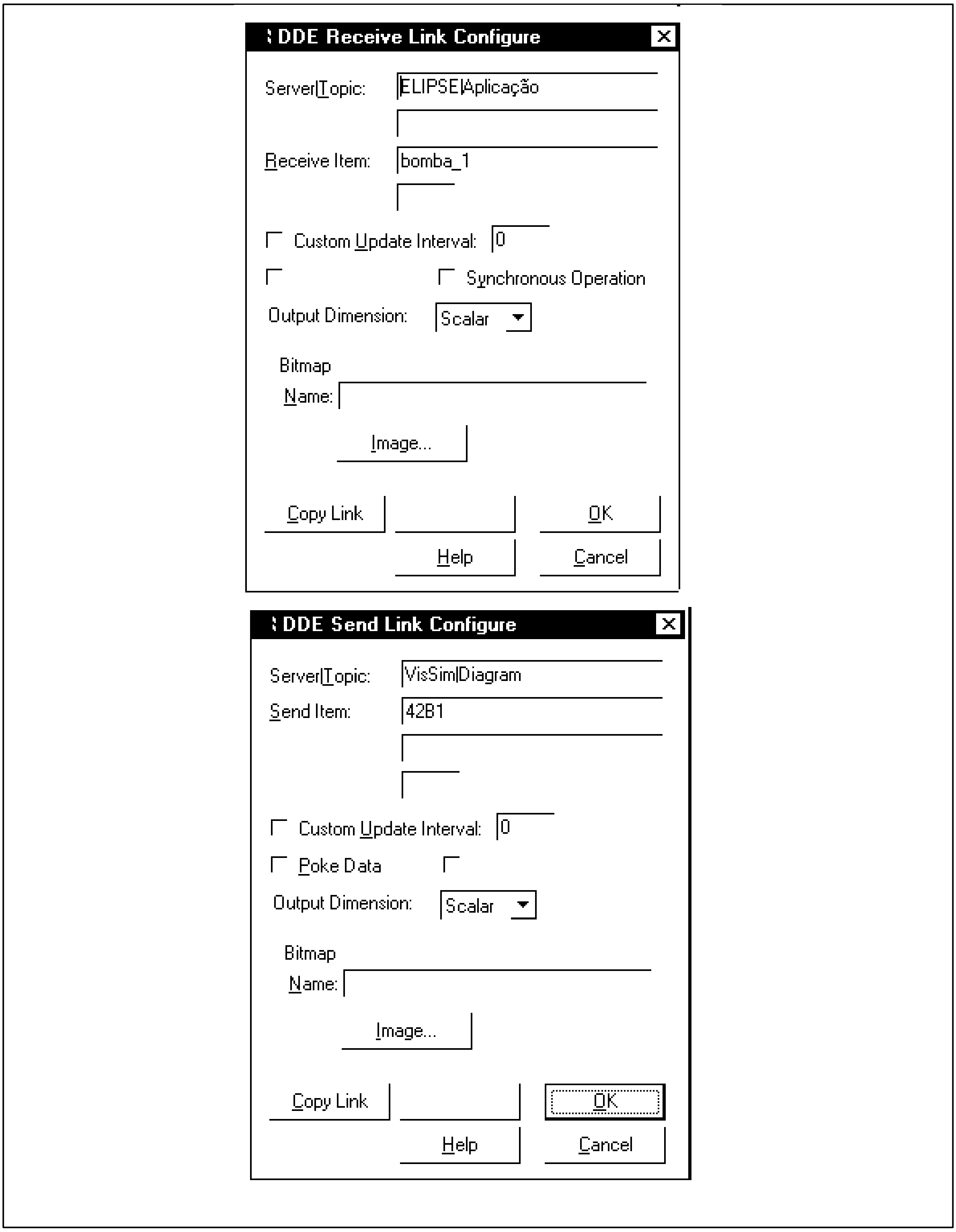
O sistema de comunicação entre o VisSim® e o Elipse Scada® foi feito através da função DDE (Dinamic Data Exchange – Troca Dinâmica de Dados), que é uma função do próprio Windows®, sendo assim o maior desafio foi descobrir a sintaxe utilizada, tanto no Elipse® quanto no VisSim®.

No VisSim® é necessário a inserção de blocos de comunicação DDE, que são os blocos DDEReceiver e DDESend. Os blocos DDESend são endereçados para escrever em um Tag que é lido pelo Elipse® através da configuração do tag DDE. Os blocos DDEReceiver são configurados com o nome de tag usado na aplicação do Elipse Scada®.

No Elipse Scada® a comunicação é feita através de Tags, quando é necessário pegar informação do VisSim®, o tag será do tipo DDE. Quando o Elipse® necessita enviar dados ao VisSim®, não é necessário tag especial, pois o VisSim® lê qualquer tipo de tag do Elipse®.

A sintaxe de comunicação no VisSim® pode ser vista na figura 25.

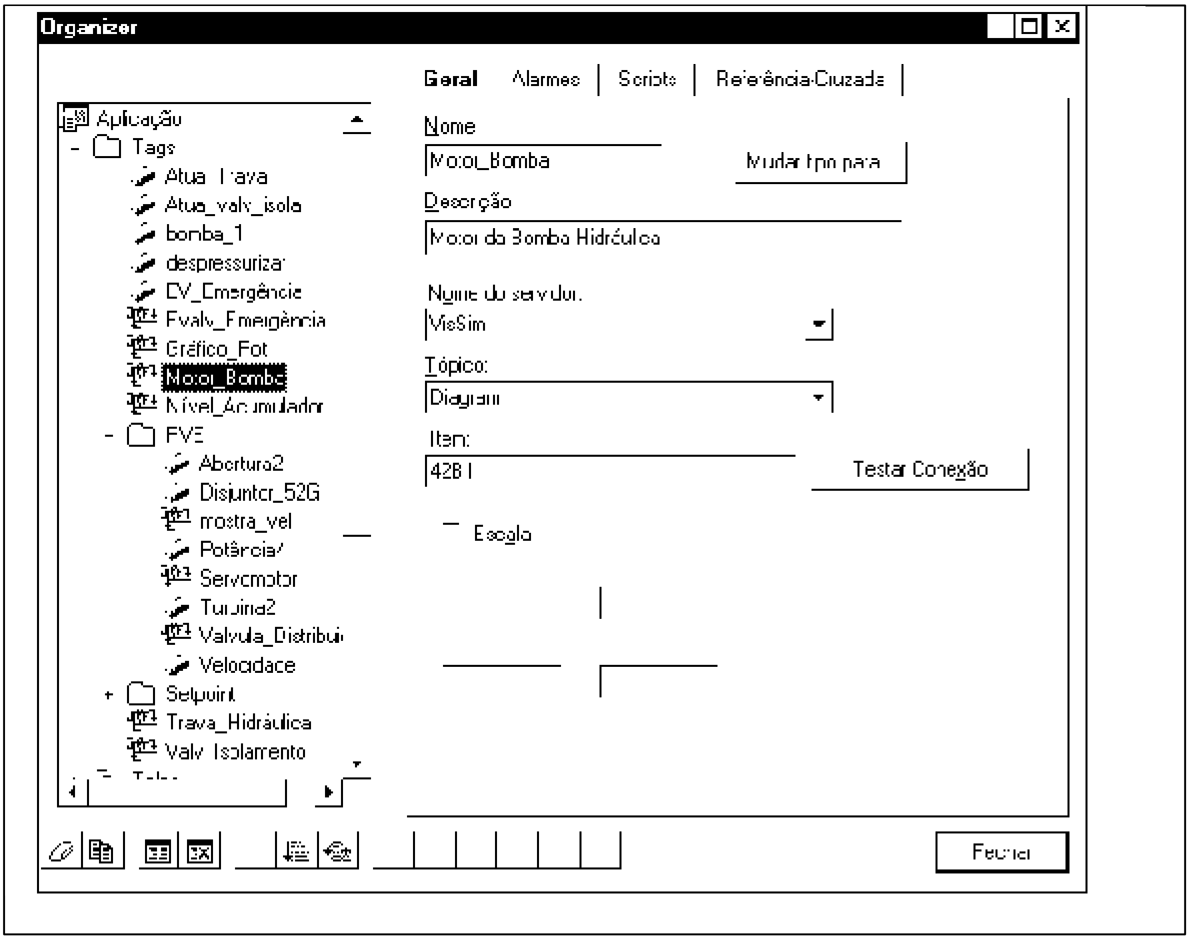
FIGURA 25 - SINTAXE DE COMUNICAÇÃO



FONTE: O AUTOR

Uma tela de configuração do Elipse® é mostrada na figura abaixo:

FIGURA 26 - TELA DE CONFIGURAÇÃO



FONTE: O AUTOR

Como não existem bibliotecas de bitmaps (figuras) no Elipse® para a aplicação, foi necessário o desenvolvimento da figuras em AutoCad® que pudessem vir a ilustrar e representar os diversos componentes do regulador de velocidade.

4.3 UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR

A Interface Homem Máquina é de simples utilização, todas as funções do regulador foram expostas em forma de botões, mostradores e gráficos sendo que o seu funcionamento é descrito no manual do simulador que consta no apêndice.

A aplicação do VisSim® deve ser aberta e executada, após este procedimento o Elipse® assume e trabalha os seus dados. Os recursos necessários para a utilização do simulador em relação a hardware são os seguintes:

a) Processador 400 MHz ou superior;
b) Memória RAM 64 MB ou superior;
c) Hard Disk 2.1 GB ou superior;
d) Drive de CD-Rom.

Já em relação a software os recursos necessários para a utilização do simulador os seguintes:

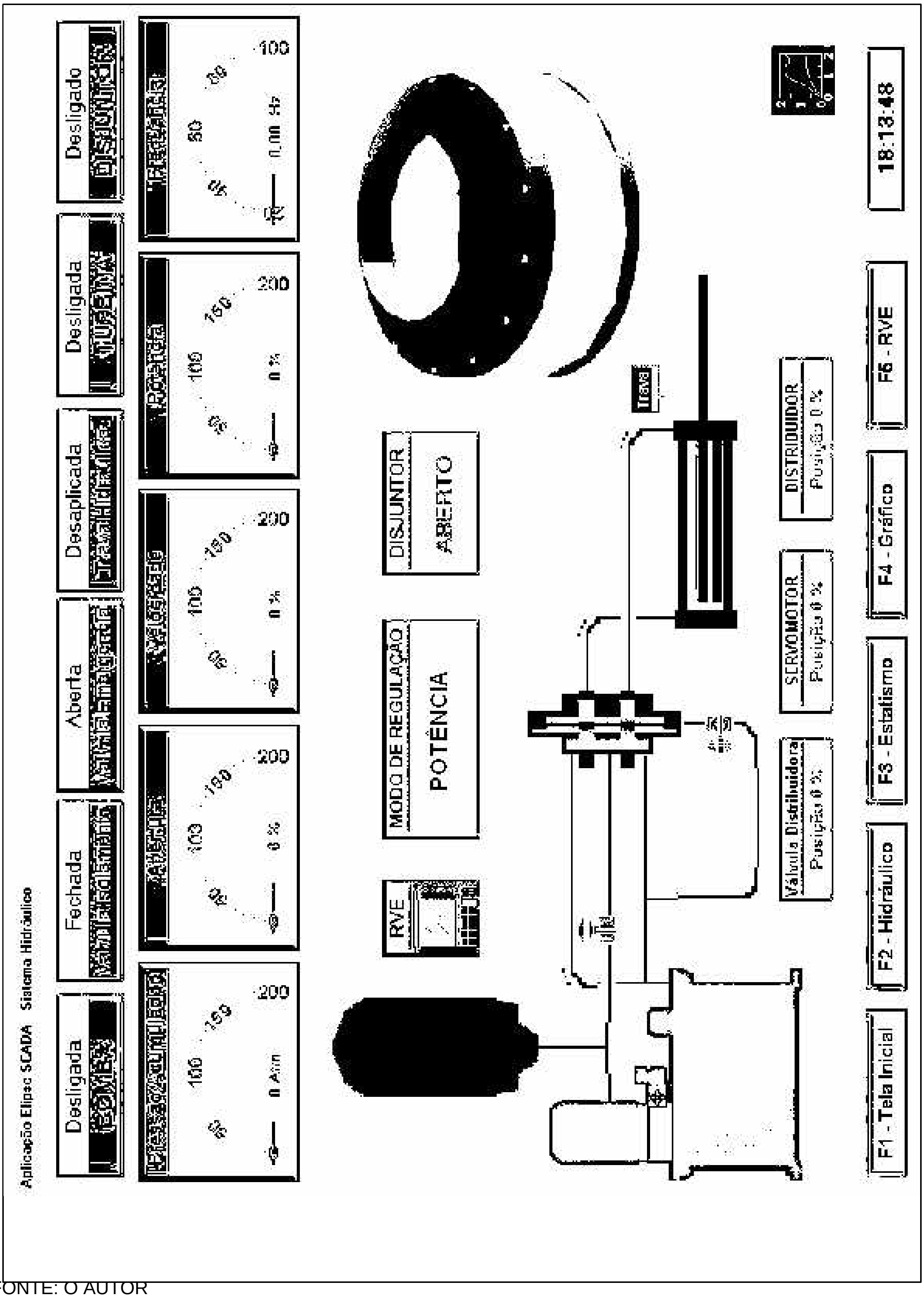
a) Elipse® SCADA V.2.22 SP 19;
b) VisSim® V.3.0E;
c) Windows® 98 ou superior.

Na utilização do Sistema Supervisório, todos os dados para operação do regulador são encontrados nas telas, entretanto existe a possibilidade de se utilizar a aplicação do VisSim® separadamente do Elipse®, com isso no caso de utilização do simulador para uma aula fica a possibilidade do professor explicar todas as funções do regulador diretamente no VisSim®.

Vale ressaltar que o simulador foi desenvolvido para ser utilizado por acadêmicos do curso de engenharia elétrica, na cadeira de geração de energia, portanto para sua aplicação é recomendado o acompanhamento de um professor que tenha conhecimentos em geração e automação.

Para ilustração vemos na figura 27 uma das janelas do simulador onde temos uma visão geral do regulador de velocidade.

FIGURA 27 - TELA DO SIMULADOR



FONTE: O AUTOR

5 CONCLUSÃO

A proposta de um simulador foi uma solução encontrada para análise do funcionamento de um sistema de potência, no qual a literatura especializada praticamente inexiste, vindo a ajudar de forma didática na formação acadêmica dos engenheiros do setor elétrico. Com isto o projeto buscou apresentar uma visão geral de um regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis através da implementação de um simulador como ferramenta de análise.

As características principais dos dispositivos e circuitos que compõem um regulador de velocidade digital foram descritas e modeladas. O modelamento do regulador foi realizado com o software VisSim® e posteriormente houve uma integração com software Elipse Scada® permitindo assim um sistema de supervisão do regulador de velocidade com a devida IHM Interface Homem Máquina.

Esta simulação do regulador de velocidade permite o acompanhamento da partida e parada do conjunto turbina-gerador, a regulação de velocidade da turbina, manutenção da freqüência nominal e ajuste da potência ativa conforme variação de carga do sistema elétrico.

Outro fator preponderante para a utilização de um simulador como ferramenta de análise, foi a possibilidade de visualizar graficamente o comportamento das principais variáveis que envolvem um regulador como abertura do distribuidor, velocidade da turbina e potência em todo o processo de operação, podendo ainda detectar possíveis falhas. Ou seja, o simulador contempla supervisão e o controle do sistema.

Foi colocado também a disposição um manual que permitisse ao usuário obter de maneira clara uma orientação para utilização do simulador facilitando assim a aprendizagem e permitindo que as diversas etapas do sistema de controle sejam acompanhadas através das diversas janelas que o mesmo disponibiliza. Vale ressaltar que o simulador foi desenvolvido para ser utilizado por acadêmicos do curso de engenharia elétrica, na cadeira de geração de energia, portanto para sua aplicação é recomendado o acompanhamento de um professor que tenha

conhecimentos em geração e automação.

Uma das dificuldades encontradas para a realização deste projeto foi o modelamento e equacionamento do circuito eletrônico. Outro aspecto foi a necessidade de desenvolver o trabalho com softwares versão acadêmica ou demo, o que veio a dificultar a utilização de diversas variáveis que envolveram o modelamento do regulador de velocidade. E finalmente, a pouca literatura a respeito do assunto para pesquisa e estudo.

Por fim, recomenda-se que trabalhos desta natureza sejam desenvolvidos pela comunidade acadêmica, procurando implementar ferramentas como esta, que só vão contribuir para a formação de cada aluno e permitir um conhecimento mais aprofundado dos temas que envolvem o setor elétrico.

GLOSSÁRIO

ABERT: abertura.

ABERTREF: variável que define um valor de referência de abertura do distribuidor.

ABERTMARCHAVAZIO: variável que define o valor de abertura do distribuidor na partida.

DELTAF: variação de freqüência. Variável que define um valor de estatismo.

ESTATIV: variável que indica o estado de operação do bloco Estatismo.

LIMITEABERT: variável que indica o valor estabelecido pelo Limitador de Abertura para abertura do distribuidor.

LIMITEABERTATUADO: variável que indica o estado de operação do bloco Limitador de Abertura.

LABERT: variável que habilita o Modo de Regulação de Abertura.

LPOT: variável que habilita o Modo de Regulação de Potência.

LVEL: variável que habilita o Modo de Regulação de Velocidade.

MIN: mínimo.

POT: potência.

POTREF: variável que define um valor de referência de potência.

RABERT: variável que indica se o Modo de Regulação de Abertura está ativo.

REF: referência.

ROT: rotação.

RPOT: variável que indica se o Modo de Regulação de Potência está ativo.

RVE: regulador de velocidade eletrônico.

RVH: regulador de velocidade hidráulico.

RVEL: variável que indica se o Modo de Regulação de Velocidade está ativo.

RVEPARTIR: variável que indica a partida do regulador de velocidade eletrônico.

RVEPARAR: variável que indica a parada do regulador de velocidade eletrônico.

SEL: seleção

SM-ZT: variável que indica o valor de deslocamento realizado pelo servomotor.

SP: set-point.

SWO: switch.

VD-ZT: variável de saída da Válvula Distribuidora que controla o deslocamento do servomotor.

VELREF: variável que define um valor de referência de velocidade.

20B1: variável que indica o estado de operação da válvula de descarga.

20VFE: variável que indica o estado de operação da eletro-válvula de emergência.

33SM-F: variável que indica o fechamento do Servomotor.

33TH-A: variável que indica a aplicação da trava hidráulica.

33TH-D: variável que indica o destravamento da trava hidráulica.

33VI-A: variável que indica a abertura da Válvula de Isolamento.

33VI-F: variável que indica o fechamento da Válvula de Isolamento.

42B1: variável que indica o estado de operação da Bomba de Descarga.

63A-H: variável que indica o valor de limite superior de pressão no Acumulador.

63A-L: variável que indica o valor de limite inferior de pressão no Acumulador.

63A-LL: variável que indica o valor de pressão mínima no Acumulador.

63A-PT: variável que indica o valor de pressão no Acumulador.

REFERÊNCIAS

ESTEVE, D.A.; BENTO JUNIOR, M. **Regulador digital VGC 211 3P2: Descrição técnica**. São Paulo: VOITH SIEMENS, 2000. Relatório técnico.

MANCINI FILHO, E. **Regulador de Velocidade: Usina de Segredo**. Curitiba: COPEL, 1987. Relatório técnico.

MANCINI FILHO, E. **Simulação Digital do Comando Automático das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Bento Munhoz da Rocha Neto**. Itajubá, 1985b. 233f. Dissertação de Mestrado - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

APÊNDICE - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR

INTRODUÇÃO

O simulador do Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas Francis é composto por dois aplicativos, sendo um o Elipse® e outro o VisSim®, assim é necessário que estes programas estejam instalados no computador em que irá ocorrer a simulação.

A operação é simples, mas requer conhecimento de uma unidade geradora. O simulador foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar um enriquecimento às aulas de disciplinas relacionadas com Geração de Energia. O professor poderá simular o regulador de velocidade para várias situações de operação de uma unidade geradora, dentre elas destacam-se: a partida da turbina, a regulação de velocidade, a tomada de carga e a parada da turbina.

O modelo do regulador de velocidade é genérico, mas foi implementado para trabalhar apenas com turbinas hidráulicas Francis que são as mais utilizadas no Brasil tanto para grandes quanto para pequenas centrais hidrelétricas.

COMPOSIÇÃO DAS TELAS

As telas possuem animações que ilustram os principais componentes do regulador de velocidade. Para efetuar as diversas funções, botões relacionam o componente específico com o comando desejado a fim de facilitar a operação.

As indicações das principais grandezas envolvidas são ilustradas através de medidores que mostram a variação das mesmas durante a operação ou através de um display. O valor de uma grandeza pode ser alterado através de uma tela de ajuste de set-point. Para mudar de uma tela para outra, na parte inferior da tela, existe uma caixa de diálogo para seleção da opção desejada.

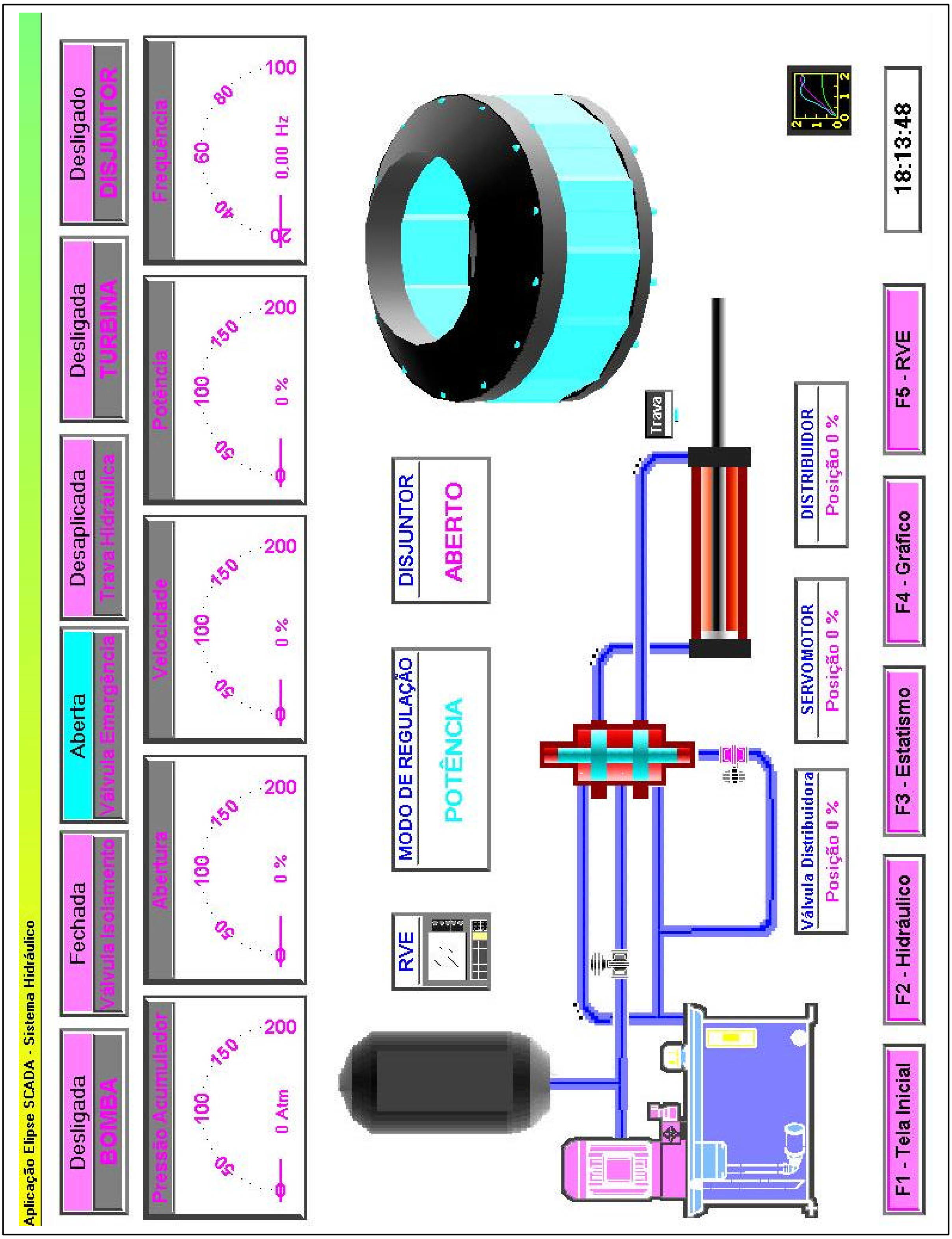
Na figura a seguir temos a tela inicial do simulador.



FIGURA 1 - TELA INICIAL DO SIMULADOR

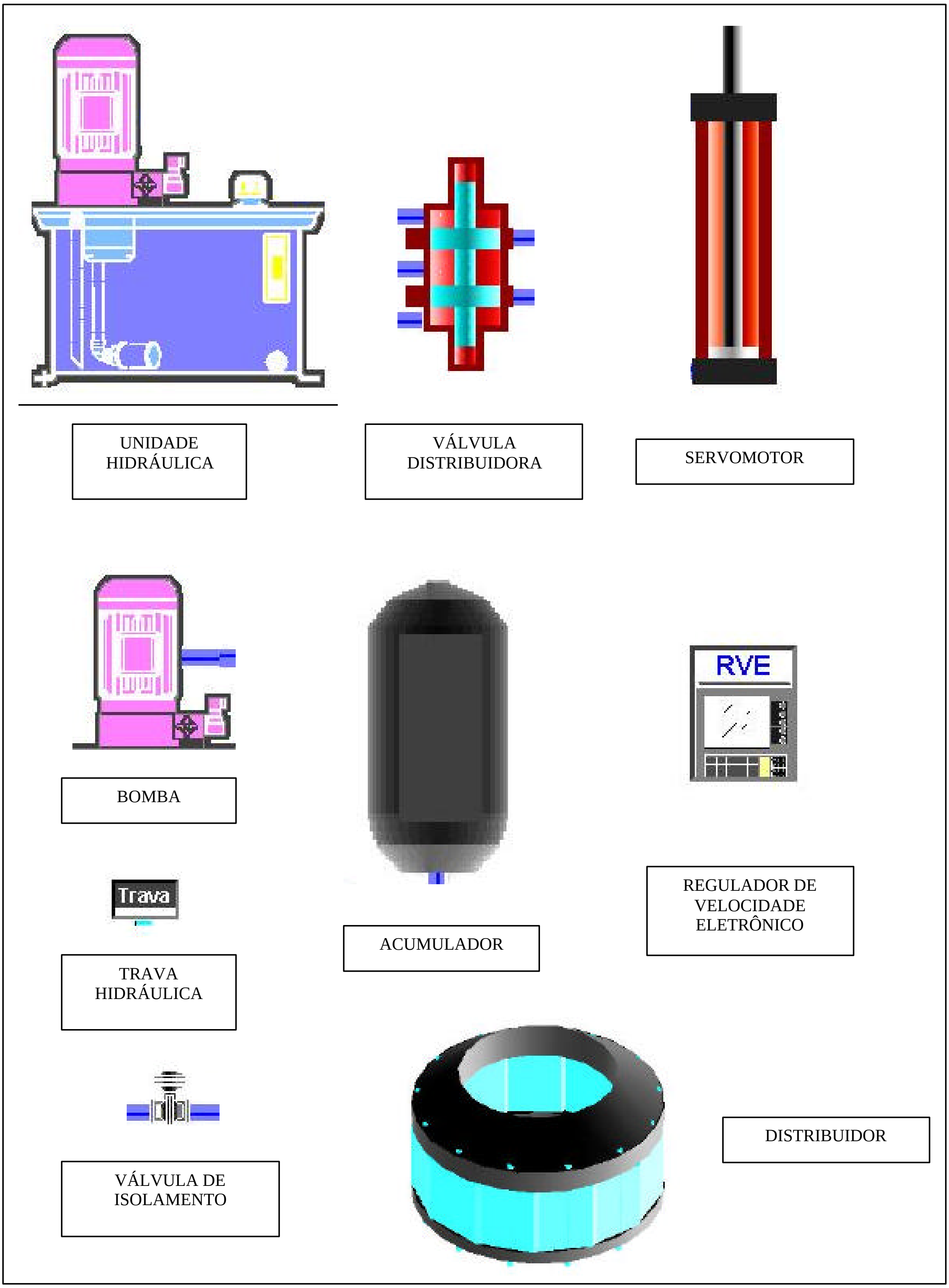
Na figura a seguir temos a tela principal do simulador.

FIGURA 2 - TELA PRINCIPAL DO SIMULADOR



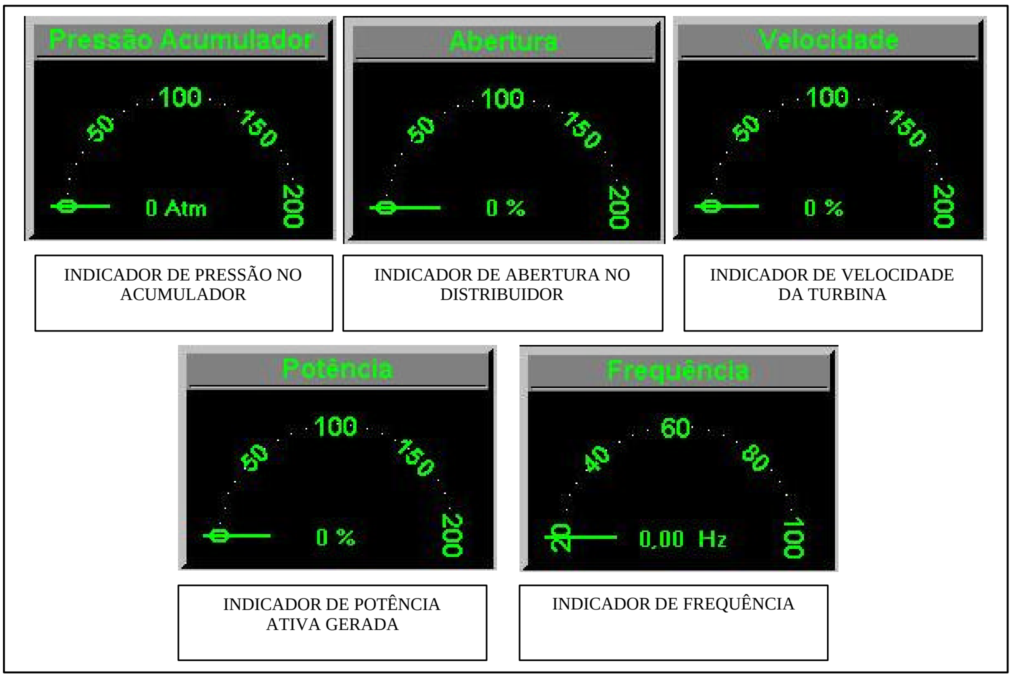
Os principais componentes ilustrativos são descritos na figura abaixo.

FIGURA 3 - DESCRIÇÃO DAS ILUSTRAÇÕES



Os medidores das principais grandezas são descritos na figura abaixo.

FIGURA 4 - DESCRIÇÃO DOS MEDIDORES



Os indicadores do estado de operação dos componentes principais são descritos na figura abaixo.

FIGURA 5 - DESCRIÇÃO DOS INDICADORES



Os botões para comandos com o respectivo componente são mostrados na figura abaixo.

FIGURA 6 - BOTÕES DE COMANDO



A caixa de diálogo para mudança de telas, o componente para seleção do Regulador de Velocidade Eletrônico são mostrados na figura abaixo.

FIGURA 7 - OPÇÕES DA CAIXA DE DIÁLOGO



O SIMULADOR

Esta seção descreve como se dará o funcionamento do Simulador do Regulador de Velocidade para Turbinas tipo Francis.

INSTRUÇÕES PARA A INSTALAÇÃO DO CD-ROM

Os equipamentos necessários para a utilização do simulador em relação a hardware são os seguintes:

a) Computador com processador de 400 MHz, ou superior;
b) Memória RAM – 64 MB, ou superior;
c) Hard Disk – 2.1 GB, ou superior;
d) Drive de CD-Rom.

A instalação dos arquivos de execução do programa se dará através de CD-Rom, que estará disponível no Departamento Acadêmico de Eletrotécnica do CEFET-Pr.

Como Instalar:

1. Coloque este CD-Rom no leitor de Cd;
2. Ele deverá abrir automaticamente;
3. Instalar os programas, clicando nos ícones correspondentes.

FUNCIONAMENTO

É necessário chamar o arquivo reg.app para iniciar aplicativo.

O simulador necessita que o Software VisSim e o Software Elipse funcionem simultaneamente e em determinada ordem. Quando abrir o arquivo de simulação no Software Elipse, clicar no ícone VisSim para chamar o arquivo de execução.

Após abertura do arquivo no Software VisSim, executar o arquivo clicando no ícone “play”. A partir deste momento o VisSim estará fornecendo os dados para que o Software Elipse possa trabalhar.

Voltar para a plataforma do Elipse.

Para o funcionamento básico do Simulador do Regulador de Velocidade, utiliza-se a tela do regulador Hidráulico. Esta tela contém a maioria dos comandos de operações e acionamentos dos dispositivos do regulador.

Para melhor esclarecimento vamos estudar alguns casos que facilitarão o entendimento do Regulador de Velocidade.

CASOS PRÁTICOS PARA SIMULAÇÃO

Nos casos práticos para simulação consideram-se satisfeitas as condições provenientes de outros equipamentos associados à turbina, ao gerador, ao sistema de excitação, à tomada d'água, ao transformador elevador, a subestação e serviços auxiliares de corrente alternada e de corrente contínua, tais como:

a) comporta da tomada d'água normalmente aberta;
b) válvula de água de resfriamento aberta;
c) freios do gerador soltos na partida;
d) mancal de escova lubrificado;
e) sistema de excitação ligado na partida da máquina antes do fechamento do disjuntor da unidade (sincronização).

Manobras manuais ou automáticas desses equipamentos citados não fazem parte do escopo deste simulador. Os principais casos práticos para simulação são:

a) partida normal da unidade até a rotação nominal;
b) sincronização e tomada de carga até 100%;
c) parada normal da unidade;
d) rejeição de carga ativa sem parada da unidade;
e) rejeição de carga ativa devido a uma parada de emergência;
f) comutação dos modos de regulação;
g) sobrefrequência do sistema mantida por um período;
h) subfrequência do sistema mantida por um período;
i) atuação do limitador de abertura;
j) tomada de carga no modo de regulação de velocidade.

1° CASO - PARTIDA NORMAL DA UNIDADE ATÉ A ROTAÇÃO NOMINAL.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento,** esperar atingir o limite de operação da bomba (50Atm);
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela.

2° CASO – SINCRONIZAÇÃO E TOMADA DE CARGA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em Abertura, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;

10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade e Potência, nos mostradores da tela.

3° CASO – PARADA NORMAL DA UNIDADE

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100%, e modo de regulação em Abertura, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência;**
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
14. Para parada, ajustar na tela de Set-Point o valor de **0%** no campo **Potência**;

15. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
16. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
17. Clicar no **Desligar Disjuntor**;
18. Clicar em **Parar Turbina**;
19. Verificar valores dos parâmetros de **Velocidade e Servomotor**;
20. Clicar em Desenergizar **Válvula de Parada de Emergência**;
21. Clicar em Fechar **Válvula de Isolamento**;
22. Desligar **Bomba**.

4° CASO – REJEIÇÃO DE CARGA ATIVA SEM PARADA DA UNIDADE

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em Abertura, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade e Potência, nos

mostradores da tela;

14. Clicar em **Ligar Disjuntor**;
15. Verificar **Disjuntor, Modo de Regulação, Velocidade, Servomotor;**

5° CASO – REJEIÇÃO DE CARGA ATIVA DEVIDO A UMA PARADA DE EMERGÊNCIA

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Desnergizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em Abertura, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
15. Verificar **Servomotor, Velocidade, Modo de Regulação**.

6° CASO – COMUTAÇÃO DOS MODOS DE REGULAÇÃO: POTÊNCIA, VELOCIDADE E ABERTURA SEM OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em Abertura, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar na tela de Set-Point a tecla **VELOCIDADE;**
15. Verificar **Modo de Regulação;**
16. Verificar a **Potência;**
17. Clicar na tela de Set-Point a tecla **ABERTURA;**
18. Verificar **Modo de Regulação;**
19. Verificar a **Potência;**

20. Clicar na tela de Set-Point a tecla **POTÊNCIA;**
21. Verificar **Modo de Regulação;**
22. Verificar a **Potência.**

7° CASO – SOBREFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 101% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE POTÊNCIA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
15. Ligar o modo **Estatismo**;
16. Ajustar valor para **1** e executar;

17. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
18. Esperar 15 segundos;
19. Desligar o modo **Estatismo**;
20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

8° CASO – SUBFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 98% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE POTÊNCIA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência.**
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
15. Ligar o modo **Estatismo**;

16. Ajustar valor para **-2** e executar;
17. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
18. Esperar 15 segundos;
19. Desligar o modo **Estatismo**;
20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

9° CASO – ATUAÇÃO DO LIMITADOR DE ABERTURA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **95%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Limitador de Abertura**;
14. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
15. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **90%** no campo **Limitador de**

Abertura;

16. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
17. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura Real e Potência, nos mostradores da tela;
18. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **Limitador de Abertura**;
19. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
20. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura Real e Potência, nos mostradores da tela.

10° CASO – TOMADA DE CARGA NO MODO REGULAÇÃO DE VELOCIDADE.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **0%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;

13. Clicar na tela de Set-Point a tecla **VELOCIDADE;**
14. Verificar **Modo de Regulação;**
15. Verificar a **Potência;**
16. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **100%** no campo **VELOCIDADE**;
17. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
18. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**;
19. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **101%** no campo **VELOCIDADE**;
20. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
21. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**;
22. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **102%** no campo **VELOCIDADE**;
23. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
24. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**;
25. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **103%** no campo **VELOCIDADE**;
26. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
27. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**;
28. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **104%** no campo **VELOCIDADE**;
29. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
30. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**;
31. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **105%** no campo **VELOCIDADE**;
32. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
33. Verificar valores dos parâmetros de **Potência**.

11° CASO – SOBREFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 101% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar na tela de Set-Point a tecla **VELOCIDADE;**
15. Verificar **Modo de Regulação;**
16. Verificar a **Potência;**
17. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
18. Ligar o modo **Estatismo**;
19. Ajustar valor para **1** e executar;

20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
21. Esperar 15 segundos;
22. Desligar o modo **Estatismo**;
23. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

12° CASO – SUBFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 98% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar na tela de Set-Point a tecla **VELOCIDADE;**
15. Verificar **Modo de Regulação;**

16. Verificar a **Potência;**
17. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
18. Ligar o modo **Estatismo**;
19. Ajustar valor para **-2** e executar;
20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
21. Esperar 15 segundos;
22. Desligar o modo **Estatismo**;
23. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

13° CASO – SOBREFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 101% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE ABERTURA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;
9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;

13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar na tela de Set-Point a tecla **ABERTURA;**
15. Verificar **Modo de Regulação;**
16. Verificar a **Potência;**
17. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
18. Ligar o modo **Estatismo**;
19. Ajustar valor para **1** e executar;
20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
21. Esperar 15 segundos;
22. Desligar o modo **Estatismo**;
23. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

14° CASO – SUBFREQUÊNCIA DO SISTEMA MANTIDA EM 98% POR 30 SEGUNDOS – MODO DE REGULAÇÃO DE ABERTURA.

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

1. Na Tela Principal, selecionar comando **F2-Hidráulico**;
2. Clicar em **Ligar Bomba**;
3. Clicar em **Abrir Válvula de Isolamento**;
4. Clicar em **Energizar Eletroválvula de Emergência**;
5. Clicar em **Desaplicar Válvula Hidráulica**;
6. Clicar em **Partir Turbina**;
7. Verificar valores dos parâmetros de Abertura, Velocidade e Potência, nos mostradores da tela;
8. Velocidade em 100% e modo de regulação em **Abertura**, clicar em **Ligar Disjuntor**;

9. Verificar se o modo de regulação está em **Potência**;
10. Clicar no ícone **RVE** ou opção **F5-RVE** na caixa de diálogo;
11. Ajustar na tela de Set-Point o valor de **50%** no campo **Potência**;
12. Clicar em **>>** para ajuste de novo valor;
13. Verificar valores dos parâmetros de Velocidade, Abertura e Potência, nos mostradores da tela;
14. Clicar na tela de Set-Point a tecla **ABERTURA;**
15. Verificar **Modo de Regulação;**
16. Verificar a **Potência;**
17. Clicar no ícone **ESTATISMO** na caixa de diálogo;
18. Ligar o modo **Estatismo**;
19. Ajustar valor para **-2** e executar;
20. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência**;
21. Esperar 15 segundos;
22. Desligar o modo **Estatismo**;
23. Verificar **Servomotor, Abertura, Velocidade e Potência.**

CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Os principais casos práticos para simulação foram descritos acima. Porém, este programa é uma ferramenta muito poderosa e pode ser utilizado para muitas outras simulações, no que diz respeito aos reguladores de velocidade.

Para parada normal da unidade, em todos os casos descritos, seguir os passos 17 ao 22, do 3° Caso.

Qualquer dúvida a respeito do simulador do Regulador de Velocidade para Turbinas Francis, acesse http://pessoal.onda.com.Br/strapa, e contate os membros da equipe para maiores esclarecimentos.

Fotos da Equipe.



Da esquerda para a direita: Miguel, Marcelo, Julio, Edmar e Viviane.



Da esquerda para a direita: Edmar, Julio, Marcelo, Prof. Mancini, Viviane, Miguel.